

BRENO DE ALMEIDA MARQUES

**CONSIDERAÇÕES AMBIENTAIS E EXERGÉTICAS NA FASE DE
PÓS-COLHEITA DE GRÃOS: ESTUDO DE CASO DO ESTADO DO
PARANÁ**

CURITIBA

2006

BRENO DE ALMEIDA MARQUES

**CONSIDERAÇÕES AMBIENTAIS E EXERGÉTICAS NA FASE DE
PÓS-COLHEITA DE GRÃOS: ESTUDO DE CASO DO ESTADO DO
PARANÁ**

**Dissertação apresentada como requisito
para obtenção do grau de mestre no curso de
Pós-graduação em Engenharia de Recursos
Hídricos e Ambiental, do Departamento de
Hidráulica e Saneamento da Universidade
Federal do Paraná.**

Orientador: Marcelo Risso Errera, Ph.D.

CURITIBA

2006

*Aos meus pais e irmãos por me
apoiarem em todos os momentos.*

A Deus
A minha família por estarem sempre torcendo pelo meu
sucesso
Ao meu Coordenador, Prof. Cristovão, pela confiança e
oportunidade
Ao meu Orientador, Prof. Marcelo Errera, pela
orientação, ensinamentos, confiança e amizade
A banca examinadora, pelas sugestões e comentários
Aos meus amigos que conquistei aqui em Curitiba e que
me ajudaram bastante
Ao grande amigo e irmão Iuri, pelo companheirismo e
amizade
A CAPES, pela bolsa de pesquisa
Ao Projeto AGROGAS II, por toda infra-estrutura e pela
oportunidade de adquirir experiência na área
Ao grupo GEANEX, por todo apoio no trabalho
A Simone P. de Souza (bolsista/Agrogás II - CNPq), por
toda a colaboração nas pesquisas e desenhos
A Flávia R. Santos (estagiária/Agrogás II – LACTEC),
pela ajuda na aquisição de dados e sugestões
A todos que contribuíram de alguma maneira para que eu
atingisse este objetivo

*“O grande sábio é aquele que consegue enxergar
seus próprios erros”*

Augusto Cury

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE SIGLAS	XII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
RESUMO	XV
ABSTRACT	XVI
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 HISTÓRICO DA SOJA NO MUNDO E NO BRASIL	6
2.2 ETAPAS DA PRODUÇÃO DE GRÃOS	8
2.3 ETAPAS DA PÓS-COLHEITA DE GRÃOS	11
2.3.1 Transporte	11
2.3.2 Recepção	13
2.3.3 Pré-limpeza e Limpeza	14
2.3.4 Secagem	15
2.3.5 Armazenamento	20
2.4 DESCRIÇÃO DE UMA PLANTA TÍPICA DE SECAGEM	24
2.5 CONSIDERAÇÕES AMBIENTAIS E ENERGÉTICAS	26
2.5.1 Lenha	26
2.5.2 Gás Natural	29
2.5.3 Gás Liquefeito de Petróleo	30
2.5.4 Óleo Diesel	31

2.5.5 Biodiesel	31
2.5.6 Características Físico-ambientais do Estado do Paraná	32
2.5.7 Impactos Ambientais no Cultivo de Soja e Milho	33
2.5.8 Impactos Hidrológicos de Áreas de Reflorestamento	34
2.5.9 Uso Racional de Fontes Primárias de Energia	36
2.6 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA	43
3 METODOLOGIA	48
3.1 PESQUISA DE CAMPO	48
3.2 CORRIDA EXPERIMENTAL	51
3.3 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA	51
3.3.1 Definição do Objetivo e Escopo	52
3.3.2 Identificação do Sistema e dos Subsistemas	52
3.3.3 Identificação do Produto, Processo ou Atividade	52
3.3.4 Definição da Fronteira e do Período	55
3.3.5 Definição dos Impactos Ambientais na Fase de Pós-Colheita de Grãos	55
3.3.6 Descarte	55
3.3.7 Definição da Unidade Funcional	56
3.3.8 Análise do Inventário	56
3.3.9 Avaliação dos Impactos	62
3.3.10 Avaliação das Melhorias	62
3.3.11 Análise da Relevância de Parâmetros Secundários	63
3.4 SIMULADOR MATEMÁTICO	67
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
4.1 ESTUDO DE CASO DO ESTADO DO PARANÁ	71
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	88

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
APÊNDICES	99
ANEXOS	111

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Mapa das fronteiras agrícolas brasileiras	8
FIGURA 2 – Moega utilizada para recepção dos grãos	14
FIGURA 3 – Máquina de pré-limpeza e limpeza	15
FIGURA 4 – Centrais de armazenamento brasileiras cadastradas na CONAB	22
FIGURA 5 – Colméia de dutos	24
FIGURA 6 – Planta típica de secagem	25
FIGURA 7 – Processo de Produção de biodiesel	32
FIGURA 8 – Cogeração para uma unidade de secagem	39
FIGURA 9 – Ciclo a vapor para uma planta de secagem de grãos	40
FIGURA 10 – Ciclo a gás para uma planta de secagem de grãos	40
FIGURA 11 – Ciclo combinado para uma planta de secagem de grãos	41
FIGURA 12 – Planta de secagem de grãos sem cogeração	42
FIGURA 13 – Planta de secagem de grãos com cogeração	42
FIGURA 14 – Fluxograma das fases de uma ACV	47
FIGURA 15 – Empresas visitadas no Estado do Paraná	49
FIGURA 16 - Empresas visitadas no Estado do Mato Grosso do Sul	49
FIGURA 17 – Laboratório de eficiência energética e exergética na indústria da soja	51
FIGURA 18 – Etapas da pós-colheita de grãos consideradas na ACV	53
FIGURA 19 - Fluxogramas detalhados das etapas consideradas na ACV	54
FIGURA 20 - Emissões atmosféricas líquidas em unidade funcional	61
FIGURA 21 – Emissões de CO ₂ ^{eq} e SO ₂ ^{eq} na fabricação de aço em unidade funcional	64
FIGURA 22 – Emissões de CO ₂ na fabricação do concreto para as fundações em unidade funcional	65
FIGURA 23 – Emissões de CO ₂ ^{eq} e SO ₂ ^{eq} na geração de eletricidade em unidade funcional	66
FIGURA 24 – Fluxo de dados do simulador	68
FIGURA 25 – Possibilidades para suprimento da demanda total de energia elétrica	69
FIGURA 26 – Emissões atmosféricas das alternativas propostas	73
FIGURA 27 – Demanda de energia térmica e custo de cada alternativa	74

FIGURA 28 – Disposição dos talhões para uma oferta sustentável de lenha	75
FIGURA 29 – Contribuição das emissões atmosféricas na fabricação do aço para construção dos equipamentos	75
FIGURA 30 – Contribuição das emissões atmosféricas na geração de eletricidade para movimentação dos equipamentos	76
FIGURA 31 – Contribuição de CO ₂ ^{eq} da fabricação do concreto para as fundações dos equipamentos	77
FIGURA 32 – Emissões atmosféricas para as alternativas propostas	78
FIGURA 33 – Demanda de energia térmica e custo de cada alternativa	79
FIGURA 34 – Emissões de CO ₂ ^{eq} e SO ₂ ^{eq} na fabricação do aço para os equipamentos	79
FIGURA 35 – Emissões atmosféricas na geração de eletricidade para movimentação dos equipamentos	80
FIGURA 36 – Emissões atmosféricas na fabricação do concreto para as fundações dos equipamentos	80
FIGURA 37 – Ciclo de cogeração adotado	82
FIGURA 38 – Comparação da planta de secagem de referência e a planta com cogeração	83
FIGURA 39 – Potencia elétrica gerada pela cogeração	84
FIGURA 40 – Comparação entre o cenário 3 e as alternativas do cenário 3	84
FIGURA 41 – Eficiência exergética da planta de secagem	87

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Principais espécies de eucalyptus plantadas no Brasil	29
TABELA 2 – Exemplo de conversão de energia	37
TABELA 3 - Valores de β para as configurações estudadas	43
TABELA 4 – Impactos ambientais associados na fase de pós-colheita de grãos	55
TABELA 5 - Principais entradas e saídas de cada etapa da pós-colheita em unidade funcional	57
TABELA 6 - Entradas e saídas dos combustíveis em unidade funcional	57
TABELA 7 – Fatores de emissões atmosféricas no ciclo de vida de cada combustível	58
TABELA 8 – Dados considerados no balanço de carbono da lenha	59
TABELA 9 – Balanço de CO_2^{eq} para lenha	60
TABELA 10 - Balanço de CO_2^{eq} para o biodiesel	60
TABELA 11 – Estimativas de quantidade de aço e energia elétrica	64
TABELA 12 – Fatores de emissões na fabricação do aço	64
TABELA 13 – Volume estimado de concreto para as fundações dos equipamentos	65
TABELA 14 – Fatores de emissões na geração de eletricidade	66
TABELA 15 – Parâmetros adotados para transporte dos grãos e combustíveis	67
TABELA 16 – Equipamentos adotados em cada etapa da pós-colheita	69
TABELA 17 – Eficiências de combustão e PCI dos combustíveis	70
TABELA 18 – Parâmetros adotados nos cálculos de biomassa	70
TABELA 19 - Dados de entrada das alternativas 1, 2, 3	72
TABELA 20 - Dados de saída das alternativas 1, 2, 3	72
TABELA 21 – Dados de entrada das alternativas 1, 2, 3, 4, 5, 6	78

LISTA DE SIGLAS

ABIOVE	Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais
ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
AGROGAS II	Desenvolvimento de Soluções a Gás Natural para Geração Distribuída e Aumento de Eficiência Energética no Setor Agroindustrial
AI	Análise de Inventário
ANP	Agência Nacional do Petróleo
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
COPEL	Companhia de Energia Elétrica do Paraná
DEPLA	Departamento de Planejamento e Desenvolvimento do Comércio Exterior
DETER	Sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Real
EIA	Energy Information Administration
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	Food and Agriculture Organization
GASBOL	Gasoduto Bolívia-Brasil
GASPETRO	Petrobrás Gás S.A
GEANEX	Grupo de Estudos em Exergia, Emergia e Termoeconomia para Estratégias de Desenvolvimento Sustentável
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GN	Gás Natural
GWP	Global Warming Potential
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPEF	Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais
IT	Interactive Thermodynamic
LEIS	Laboratório de Eficiência Energética e Exergética na Indústria da Soja
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
OD	Óleo Diesel
PA	Potencial de Acidificação
PCI	Poder Calorífico Inferior
PI	Preservação de Identidade
RN	Recursos Naturais
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS MAIÚSCULAS

Ac	Massa de aço necessária por equipamento (ton)
AC	Relação mássica de ar combustível
A _{cob}	Área da cobertura de cada equipamento (m ²)
AC _t	Massa total de aço para todos os equipamentos (ton)
AE	Aeração
A _l	Área lateral de cada equipamento (m ²)
ARS	Área de reflorestamento sustentável (ha)
A _t	Área total de cada equipamento (m ²)
C	Consumo de combustível
CA	Capacidade dos armazéns (ton)

CCF	Ciclo de crescimento de floresta (anos)
CP	Capacidade do caminhão (ton ou m ³)
CS	Capacidade do secador (ton)
E	Exergia
EL	Energia elétrica (MWh)
ELC	Emissões líquidas de carbono (ton)
FC	Frota de caminhões
FE	Fator de emissão (kg/GJ)
G _{seco}	Grãos secos (ton)

G _u	Grãos úmidos (ton)
MP	Material particulado (kg)
NA	Números de armazéns
NS	Número de silos
NSC	Número de secadores
PAC	Potencial de acidificação
PAG	Potencial de aquecimento global

PCI	Poder calorífico inferior (GJ/ton)
PR	Produtividade da lenha (m ³ /ha.ano)
Pt	Potência necessária (cv)
Q	Demanda de energia térmica (GJ)
Q̇	Calor por unidade de tempo (kW)
R _a	Constante universal dos gases
S	Capacidade dos silos (ton)
T	Temperatura (K)
TO	Tempo de operação do equipamento (h)
TR _j	Transporte de combustível
U _a	Umidade de b.u. (%)
U _c	Umidade de chegada do campo em b.u. (%)
Ẇ _{el}	Trabalho por unidade de tempo (kW)

LETRAS GREGAS

β	Razão entre efeito elétrico e efeito térmico
ρ	Massa específica do aço (kg/m ³)
η _i	Eficiência do gerador de calor (%)
ω̃	Umidade absoluta do ambiente
ηII	Eficiência exergética

SUBSCRITOS

0	Referência
a	Armazenamento
Amb	Ambiente
adc	Adiabática de chama
Ae	Aeração
c	Campo
cob	Cobertura de cada equipamento
e	Espessura do aço
el	elétrico
GN	Gás Natural
i	Índice representativo do gerador de calor
j	Índice representativo de cada combustível
Lp	limpeza
o	operação
P	pré-limpeza
P _j	Produção de cada combustível
sc	secagem
t	total
TG	Transporte dos grãos
u	úmidos

LETRAS MINÚSCULAS

anoa	Ano agrícola
b.s.	Base seca
b.u.	Base úmida
\dot{m}	Fluxo mássico (kg/s)
h	Entalpia (kJ/kg)
c_p	Calor específico do ar
c_{pv}	Calor específico do vapor d'água
ton	Tonelada
w	Umidade absoluta

SOBRESCRITOS

C	Cinética
F	Física
P	Potencial
Q	Química

RESUMO

A área cultivada de grãos no Brasil vem crescendo a cada ano (2,8% em relação à safra 03/04), deixando o país no patamar do 2º maior produtor mundial de grãos. A produção por sua vez tem oscilado a cada ano em função das perdas por condições climáticas e pela logística de transporte e armazenamento. Na fase de pós-colheita, os grãos são pré-processados para que adquiram qualidades exigidas para o armazenamento, a comercialização, a exportação e a produção de derivados. O pré-processamento dos grãos é bastante peculiar, pois as safras de soja e milho duram em média 3 meses, enquanto que os grãos são utilizados ao longo de todo ano para atender aos seus diversos fins. Este fato faz com que as etapas de pós-colheita devam ser adequadamente planejadas e executadas. Entre os principais fatores limitantes neste pré-processamento de grãos está a alta demanda de energia térmica para secagem (etapa fundamental). No Paraná esta demanda pode chegar a 5.000 TJ/anoa (Brasil aproximadamente 30.000 TJ/anoa), a maioria desta demanda térmica é atendida com lenha, cerca de 85%. Portanto, esta dissertação tem como objetivo avaliar os potenciais de impactos ambientais decorrentes das emissões atmosféricas em toda fase de pós-colheita de grãos, seguindo os critérios adotados para Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) (ISO 14040, 14041, 14042, 14043). A produção brasileira de grãos em larga escala interfere na sustentabilidade energo-ambiental. Para mostrar isso, cenários foram criados considerando as implicações da alta demanda térmica, e avaliados em um período de 21 anos. O desempenho ambiental de sete alternativas em três diferentes cenários foram avaliadas através de simulações numéricas. Um dos cenários considerou uma planta de secagem com uso de cogeração, com intuito de se obter um melhor aproveitamento dos energéticos. Este último cenário também foi simulado através de um modelo matemático, considerando o conceito de exergia. Os resultados estão apresentados em gráficos e tabelas e mostraram a relação entre o potencial de aquecimento global e de acidificação das emissões atmosféricas de diferentes combustíveis. Mostraram ainda que a sustentabilidade energo-ambiental da fase de pós-colheita em grande escala depende da fonte e das formas de utilização dos energéticos.

Palavras chaves: Pós colheita de grãos, cogeração, impactos ambientais, avaliação de ciclo de vida.

ABSTRACT

The area dedicated to grain plantations in Brazil has been under continuous and significative expansion in the last decade. That lead the Brazilian grain yield to be the second largest in the world. Nevertheless, in the last three years remarkable losses took place mainly due to unfavorable weather and faulty logistics (transportation and storage). Last year's losses solely related to postharvest logistics summed up near 8% of the grain yield. Some of the processes in the postharvest stage play important role to make the crops meet quality standards for storage, trading and further processing along the year. Hence the proper pre-processing of grain crops is of utmost importance since harvest season lasts for short periods. Drying is the main process grains undergo in the postharvest phase, and it is also the most thermal energy intensive process. The global thermal energy demand for the State of Parana can be as large as 5,000 TJ for an agricultural year (countrywide Brazil near 30.000 TJ). All thermal energy is obtained from fuel burning. Therefore the main goal of this dissertation is to evaluate the potential environmental impacts of the atmospheric emissions throughout the entire postharvest stage. The study was guided by the Life Cycle Assessment methodology LCA (ISO). The large scale of grains yield in Brazil raises issues of energy and environmental sustainability. To cover that, a case scenarios study was also performed considering the implications of the use of large amounts of thermal energy in a 21-years period. The environmental performance of seven alternatives in three different scenarios was evaluated through numerical simulations. One of the scenarios considered that drying plants made use of the cogeneration to improve energy use. This last scenario was also simulated by a mathematical model that considered the concept of exergy. Results were presented in tables and charts. They show a trade-off between global warming potential and acidification potential of the exhaust gases from different fuels when all the chain of supply of the fuels is considered. They show that the energy and environmental sustainability of postharvest process in such large scales depends greatly on the way fuel is supplied and use.

Keywords: Postharvest, Life Cycle Assessment, Cogeneration, environmental impacts

1 INTRODUÇÃO

Grãos, principalmente soja, respondem por grande parte das exportações¹ brasileiras. A produção de grãos da safra 03/04 beirou as 120 milhões de toneladas. Já na safra 04/05 a produção ultrapassou as 113 milhões de toneladas. A produção brasileira de soja e milho nesta safra foi de 51 e 34,9 milhões de toneladas, respectivamente. O Estado do Paraná teve uma produção de aproximadamente 9,5 para soja e 8,3 milhões de toneladas para o milho na safra 04/05 (CONAB, 2005).

Alguns fatores devem ser analisados para que a produção brasileira de grãos continue em crescimento de forma sustentável, com mínimos prejuízos ao homem e ao meio ambiente.

O principal fator que pode influenciar a sustentabilidade energo-ambiental da agroindústria brasileira é a alta dependência por energia térmica no pré-processamento² de grãos, principalmente na secagem, e posteriormente quando da ocasião da extração do óleo e produção de derivados. Assim, surgem preocupações em relação ao atendimento desta demanda térmica. Este problema abre caminho para busca de soluções energéticas que utilizem outras fontes primárias de energia, incluindo a composição com diferentes energéticos, bem como aumento da eficiência energética e da racionalidade de seu uso através, por exemplo, de plantas de secagem com uso de cogeração.

A demanda térmica energética para secagem de soja da safra paranaense 04/05 foi da ordem de 2.100 TJ³ (para a safra brasileira este valor é de aproximadamente 11.300 TJ). Esta demanda é suprida por diversos combustíveis como: gás natural (GN), gás liquefeito de petróleo (GLP), óleo diesel (OD), lenha, entre outros.

¹ Segundo DEPLA (2006) o milho também já aparece no cenário das exportações brasileiras, porém em menores proporções que a soja.

² O Pré-processamento abrange desde o transporte do campo até o armazenamento dos grãos dentro dos padrões de qualidade.

³ Valor calculado com base no estudo de ERRERA et al. (2002).

Estudos realizados no Paraná, apontam a lenha como principal combustível utilizado no pré-processamento dos grãos, podendo atingir 1.785 TJ (85%) do total demandado (e.g. ERRERA et al., 2002)

O uso da lenha em grande escala como fonte energética requer atenção para as formas de obtenção (extração) deste energético, pois, segundo o artigo 44 do Código Florestal Brasileiro (Lei n.º 4.771/65) incluído pela Lei n.º 7.803/1989, a extração de madeira de florestas nativas é limitada. De acordo com o código, as áreas a serem exploradas devem permanecer com uma reserva legal de 20% de sua cobertura original (com exceção da Amazônia, que deve permanecer com 80% de sua cobertura vegetal). Assim, para que haja uma oferta contínua de biomassa energética ao longo dos anos, faz-se necessário avaliar o ciclo de crescimento das florestas plantadas e o ciclo da produção de grãos no país. Enquanto os grãos são culturas de ciclo anual, as florestas energéticas de espécies exóticas, como o eucalipto, e de espécies nativas, como a bracatinga, têm um ciclo de crescimento médio de seis a sete anos. Por conseguinte, são necessários de seis a sete talhões⁴ em diferentes estágios de crescimento para uma determinada área plantada de soja.

Para que isso ocorra, sistemas silviculturais corretamente elaborados de eucalipto e bracatinga, e o manejo adequado de florestas nativas, devem ser implementados.

Se por um lado, os projetos de silvicultura apresentam altas produtividades e são fontes renováveis de energia primária, grandes áreas de reflorestamento em monocultura levam a outros problemas ambientais de ordem ecológica (diminuição de biodiversidade e abundância populacional) e hidrológica (alto consumo de água). Portanto, é importante uma avaliação quanto ao uso da lenha como energético para o setor agroindustrial.

Com relação à escolha do Estado do Paraná para o estudo de caso, deve-se ao fato de ser o segundo maior produtor de soja do Brasil (9,541 milhões de toneladas)

⁴ Terreno demarcado entre dois regos, utilizado para cultura.

e primeiro produtor de milho (8,34 milhões de toneladas) e, além disso, possui o maior parque de processamento de grãos do país. Segundo o último levantamento realizado pela Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE, 2005), o Paraná tem a maior capacidade instalada de processamento de grãos, refino de óleo e envasamento do Brasil. O Estado do Paraná pode processar até 32.115 ton/dia de grãos (23,4% do país), refinar até 3.160 ton/dia de óleo (17,5% do país) e envasar até 1.581 ton/dia (11,5% do país). Tais números justificam a escolha do Paraná para aplicação deste estudo.

A produção e a pós-colheita de grãos são fases compostas por muitos processos e etapas importantes, um dos motivos pelo qual a literatura apresenta muitos estudos específicos para cada etapa.

ALLMARAS et al. (1998), FEARNSIDE (2001), ORTEGA e MILLER (2000), pesquisaram sobre os impactos ambientais da produção de soja e milho; CAIXETA FILHO (1996, 1997a, 2000, 2001) e HIJJAR (2004) se preocuparam com a logística dos transportes; DALPASQUALE (2002), entre outros, pesquisou as etapas de recepção e limpeza de grãos; ARINZE et al. (1994), SOPONRONNARIT et al. (2001), CHEMKHI et al. (2004), PRACHAYAWARAKORN et al. (2004), estudaram técnicas de secagem e CROTTY (1979), DAI et al. (2002) e BIAGI et al. (2002) realizaram estudos sobre o armazenamento. Nenhum estudo foi realizado abordando todas as etapas de pós-colheita de grãos, com intuito de avaliar o potencial de impacto de toda fase.

1.1 OBJETIVO

- ✓ **Avaliar os impactos ambientais decorrentes das emissões atmosféricas em toda fase de pós-colheita de grãos.**

Com os seguintes objetivos específicos:

- ✓ Levantamento do perfil energético de unidades de pré-processamento;
- ✓ Estudo das entradas (material e energia) e saídas de todas as etapas da fase

de pós-colheita⁵ de grãos;

- ✓ Desenvolvimento de dois simuladores matemáticos, utilizando o aplicativo Excel e o modelo *Interactive Thermodynamic*⁶ (IT) do *Equation Engineering Solver*.
- ✓ Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) da fase de pós-colheita de grãos e análise do uso racional de fontes primárias de energia;
- ✓ Quantificação das emissões atmosféricas em toda fase de pós-colheita de grãos;
- ✓ Análise exergética do uso de cogeração acoplada a uma planta de secagem de grãos.

1.2 APRESENTAÇÃO

Os assuntos apresentados nesta dissertação estão divididos nos seguintes capítulos:

Capítulo 2 - *Revisão bibliográfica*: foram apresentados estudos da literatura sobre diversos assuntos relacionados à agroindústria, tais como: produção e distribuição paranaense e brasileira de soja e milho, etapas de produção de grãos, etapas de pós-colheita dos grãos e descrição de uma planta típica de secagem. Também serão encontradas considerações ambientais sobre os combustíveis utilizados na agroindústria, e conceitos sobre cogeração, exergia, bem como estudos sobre análises exergéticas de plantas de secagem.

Capítulo 3 – *Metodologia*: a metodologia utilizada neste trabalho contemplou os seguintes passos:

- ✓ Pesquisa de campo → visitou-se unidades de pré-processamento de médio e grande porte para levantamento do perfil energético.

⁵ Pós-colheita é a fase que inicia após a colheita dos grãos indo até o armazenamento, também chamado de pré-processamento.

⁶ Programa que acompanha Moran e Shapiro (2002).

✓ Avaliação de Ciclo de vida (ACV) → também conhecida como “análise do berço ao túmulo”, que consiste em analisar os impactos ambientais desde a extração da matéria prima de um produto até o descarte do mesmo para o meio ambiente. Foi adotada esta metodologia neste trabalho, dando enfoque a toda fase de pós-colheita de grãos.

✓ Simuladores → desenvolveu-se um simulador para cálculos das entradas e saídas da Análise de Inventário (AI) e prospecção de cenários, e um modelo termodinâmico para simulação de uma planta de cogeração, acoplada a uma planta de secagem de grãos.

Capítulo 4 - Resultados e discussões: neste capítulo realizou-se um estudo de caso para o Estado do Paraná, com desenvolvimento de cenários para o setor agroindustrial. Os resultados são apresentados em tabelas e gráficos comparativos, e foram discutidos de forma a mostrar as vantagens e desvantagens das diversas alternativas de soluções propostas para sustentabilidade energo-ambiental no estudo de caso.

Capítulo 5 – Conclusões e recomendações: são apresentadas as principais conclusões deste trabalho. Como recomendações para futuras pesquisas, foram levantadas questões pertinentes relacionadas à fase de pós-colheita de grãos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados conceitos e estudos relacionados à produção e pós-colheita de grãos, considerações ambientais e energéticas sobre combustíveis utilizados na agroindústria e análises exergéticas de plantas de secagem.

2.1 HISTÓRICO DA SOJA NO MUNDO E NO BRASIL

Segundo LIU⁷, apud AN (2003) a soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma oleaginosa, com coloração verde (planta), textura macia (grãos), sabor pouco amargo, altos teores de ácido ascórbico⁸ e β -Carotena⁹ e baixas quantidades de fatores antinutricionais¹⁰, com 17-19% de proteínas e 35-40% de gordura. Mais informações sobre as características da soja em SIMONNE et al. (2000) e SOPONRONNARIT et al. (2001).

MOTA¹¹, apud SPEHAR (1995) afirma que a soja é originária da costa leste da Ásia, principalmente China, região com latitude de 40° N, clima continental caracterizado por invernos muito frios e verões bastante quentes. Neste ambiente a soja começa a florir nos dias mais longos e atinge sua maturidade no outono.

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2004) na segunda década do século XX os Estados Unidos começaram a exploração comercial da soja como forrageira¹², e já em 1940 os EUA cultivava cerca de 2 milhões de hectares. A partir de 1941 a área cultivada para grãos superou a de forragem, com um crescimento exponencial dos grãos não só nos Estados Unidos

⁷ LIU, K. Soybeans: chemistry, technology, and utilization. New York: Chapman and Hall. 1997.

⁸ Também conhecido como Vitamina C.

⁹ Também chamado de Pro-Vitamina A.

¹⁰ Os fatores antinutricionais presentes em alimentos podem provocar efeitos fisiológicos adversos ou diminuir a biodisponibilidade de nutrientes (SILVA E SILVA, 2000).

¹¹ MOTA, F. S. Condições climáticas dos principais centros mundiais. In: MIYASAKA, S.; MEDINA, J. C. (Ed.). A soja no Brasil, Campinas: IAC. 1981.

¹² Segundo Melo (2005) a forragem serve como alimento para animais.

como em outros países, principalmente, Brasil e Argentina. A soja foi uma das culturas que mais cresceu nos últimos 32 anos, aproximadamente 333% em todo mundo, chegando a uma produção de 189,2 milhões de toneladas, enquanto que as culturas como: arroz, milho, feijão, cevada e girassol cresceram 79%, 86%, 140%, 52%, 19%, 177%, respectivamente.

No Brasil, a introdução da soja iniciou-se com os primeiros materiais genéticos vindos dos Estados Unidos e testados no Estado da Bahia, em 1882. Porém, devido às baixas latitudes daquele Estado (latitudes de 12° S) não se obteve êxito. Após uma década, novos testes no Estado de São Paulo foram feitos (latitude de 23° S) com relativo êxito. Somente em 1900, quando a soja foi testada no Rio Grande do Sul (latitude de 28° S a 34° S), foi que se obtiveram melhores resultados devido à semelhança das características deste Estado com a região de origem dos materiais avaliados. No Brasil o cultivo da soja também começou como forrageira.

A primeira referência de produção comercial de soja no Brasil ocorreu no ano de 1941, com uma área cultivada de 640 ha e uma produção de 450 toneladas (rendimento de 700 kg/ha). A partir daí a produção nacional cresceu significativamente, em função de incentivos fiscais à produção de trigo, o que beneficiou diretamente a soja, pela combinação técnica e econômica entre as culturas. No final da década de 70 a soja assumiu o posto de principal lavoura do agronegócio brasileiro, chegando a 15 milhões de toneladas (1979) (EMBRAPA, 2004).

De acordo com EMBRAPA (2005), atualmente o Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja, com uma produção de aproximadamente 51 milhões de toneladas (safra 04/05). Apesar das condições climáticas desfavoráveis em decorrência de estiagem, principalmente no Sul do Brasil, ter impedido um melhor rendimento da produção, esta ainda aumentou cerca de 2,5% quando comparada a safra 03/04, de 49,7 milhões de toneladas.

A Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) aponta o cerrado como a região de maior produção de soja no Brasil, com uma área plantada de aproximadamente 10,85 milhões de hectares na safra 04/05. Destaca-se o Estado do

colheita.

Preparo do solo

Segundo EMBRAPA (2004) o plantio direto é a prática mais adequada de manejo e conservação do solo. Quando não for possível a adoção do plantio direto recomenda-se o plantio convencional (aração¹³ e escarificação¹⁴), porém, com o mínimo de movimentação do solo para manter a superfície rugosa e os resíduos culturais total ou parcialmente na superfície.

Muitas vezes outras ações se fazem necessárias dependendo das características do solo, como, por exemplo, correções de acidez através da calagem, adubação, entre outras.

Semeadura

A EMBRAPA (2004) recomenda adquirir sementes junto aos órgãos federais e estaduais como Ministério da Agricultura ou as Secretarias de Estado de Agricultura. A escolha da variedade possibilita em grande parte uma boa safra.

Como o Brasil é um país de diversos climas e microclimas, não existe uma época fixa para semeadura e, isto varia de acordo com cada tipo de clima. De um modo geral a soja é plantada quando já passou o período de geadas e o solo estiver úmido, em condições de possibilitar a germinação das sementes. Isto ocorre na primavera e depois de iniciada a estação chuvosa. A época de plantio é extremamente importante quando a finalidade é produzir sementes. No entanto, quando se deseja massa verde como forragem, segundo EMBRAPA (2004), a importância do momento do plantio é menor.

Outros aspectos influenciam na semeadura da soja como: umidade do solo, espaçamento entre sementes, profundidade da cova, etc. (e.g. EMBRAPA, 2004).

¹³ A aração é o processo em que é usado um arado, equipamento tracionado que revolve a terra, melhorando assim a estrutura do solo (EMBRAPA, 2004).

¹⁴ (1) Ato de fender a superfície do solo como trabalho preparatório para a semeadura natural ou direta (AMBIENTE BRASIL, 2006).

Rotação de culturas

De acordo com EMBRAPA (2004) a rotação de culturas, que é um processo de cultivo para preservação ambiental, influi positivamente na recuperação, manutenção e melhoria dos recursos naturais. Esta viabiliza produtividades mais elevadas, com mínima alteração ambiental. Outras vantagens do uso contínuo da rotação de cultura são preservar ou melhorar as características físicas, químicas e biológicas do solo, além de auxiliar no controle de plantas daninhas, doenças e pragas. A rotação repõe restos orgânicos e protege o solo da ação dos agentes climáticos, ajuda a viabilização da semeadura direta e diversifica a produção agropecuária.

Colheita

A colheita constitui uma importante etapa do processo produtivo da soja. Quando a lavoura é destinada ao consumo ou à produção de sementes, esta etapa deve ser iniciada tão logo a soja atinja o ponto de colheita, a fim de evitar perdas na qualidade do produto. Segundo EMBRAPA (2004) as principais perdas neste processo são: mau preparo do solo, espaçamento e densidade inadequada, sementes (cultivares) não adaptadas, ocorrência de plantas daninhas, retardamento da colheita e umidade inadequada.

Existem dois tipos de colheita:

- ✓ Colheita dos grãos;
- ✓ Colheita como forragem.

Quando se trata de obter grãos, a colheita se dá quando as folhas amarelam e começam a cair e as vagens estão amareladas e parcialmente secas, ainda incompletamente maduras. Não se espera que a maturação se complete para evitar a perda de grãos pela abertura das vagens. Se a colheita for prematura, a maturação das vagens será irregular e incompleta, reduzindo consideravelmente a safra e, se a colheita for tardia, grande parte dos grãos cairá no terreno porque as vagens abrirão no campo de cultura.

Quando se deseja a massa verde como forragem, faz-se o desbaste do sojal após o início da floração, quando as vagens estiverem se formando. Evita-se fazer o

desbaste do sojal após a floração, pois a planta estará bastante lenhosa e com valor forrageiro menor.

2.3 ETAPAS DA PÓS-COLHEITA DE GRÃOS

A pós-colheita de grãos é o foco principal deste trabalho por ser a uma fase com grande potencial de impacto ambiental, especialmente os oriundos das emissões atmosféricas no uso de fontes primárias de energia. A fase de pós-colheita consiste em: transporte, recepção, pré-limpeza e limpeza, secagem, armazenamento e comercialização. A seguir serão detalhados estas etapas.

2.3.1 Transporte

No Brasil alguns centros de excelência em estudos de logística estudam a questão do transporte dos grãos brasileiros. Entre eles estão o Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial (ESALQ-LOG) e o Centro de Estudos em Logística (CEL – COPPEAD/UFRJ).

Estes estudos (CAIXETA FILHO, 1996, 1997a, 2000, 2001) vêm desde muitos anos mostrando os principais “gargalos”¹⁵ para as soluções de problemas de transporte, principalmente no que tange as perdas da colheita.

BRANCO e CAIXETA FILHO (2004) apontam como um dos grandes “gargalos” do transporte de grãos a ineficiência de mecanismos que propiciem o fluxo de informação em direção aos elos finais da cadeia produtiva como, por exemplo: rastreabilidade do produto, preservação de identidade (PI) e segregação. Isto faz com que os clientes tenham informações precisas sobre o produto. Esta prática vem sendo bastante difundida em grandes países exportadores de grãos, como EUA, Canadá e Austrália.

Grande parte do transporte de grãos (soja e milho) no Brasil é concentrada

¹⁵ Termo usado na área de logística de transportes para representar limitações e restrições.

no primeiro semestre do ano, devido à sazonalidade de suas safras, o que gera sobrecarga para os modais¹⁶ de escoamento da produção, principalmente no rodoviário. Esta situação acontece tanto no momento do transporte do campo para o processamento quanto para comercialização.

Segundo CAIXETA FILHO (1997b) e HIJJAR (2004) os modais tipicamente mais eficientes para escoamento de produtos com as características da soja produzida no Brasil (grandes volumes, longas distâncias e valor agregado relativamente baixo) são as ferrovias e hidrovias. Tais modais, embora exijam um maior tempo de transporte, têm capacidade bem mais elevada e, quando disponíveis, podem trazer economia de custos e redução de perdas. O papel do modal rodoviário, por sua vez, seria de atuação nas “pontas”, levando os grãos aos terminais ferroviários ou hidroviários. Entretanto, para que as ferrovias se tornem um modal muito utilizado, é necessária uma abrangência maior das redes ferroviárias.

A infra-estrutura ferroviária e hidroviária do país não é suficiente para realizar o escoamento de grãos, o que faz com que seja necessária a utilização de caminhões para o transporte da maioria da produção de soja brasileira, mesmo quando as distâncias a serem percorridas são elevadas. Além disto, um caminhão carrega cerca de 150 vezes menos soja do que uma composição ferroviária e cerca de 600 vezes menos do que um comboio de barcas numa hidrovia como a do Rio Madeira. Adicionado a menor capacidade do modal rodoviário está o alto índice de acidentes e um maior consumo de combustível.

MARTINS E CAIXETA FILHO (1998), analisaram a utilização das ferrovias existentes no Estado do Paraná, bem como o aumento das mesmas para escoamento da produção de grãos do Estado e concluíram que o incremento no transporte ferroviário modificaria significativamente o transporte dos grãos, podendo chegar a 44% do total do escoamento. Para isto seria necessário corrigir o estrangulamento que surgiria no modal ferroviário após a cidade de Guarapuava-PR.

¹⁶ Termo utilizado para expressar a modalidade do transporte.

Outros pontos são relevantes no processo de escoamento dos grãos, como o tempo de carregamento e descarregamento de vagões nos terminais e a logística nos portos brasileiros. Como exemplo disto, pode-se citar o grande congestionamento tanto em terra quanto em mar formado no porto de Paranaguá-PR para escoamento de parte da safra 03/04. As principais causas foram: a pouca disponibilidade de armazenagem, baixa quantidade de píeres, falta de coordenação entre o que é enviado e o que pode ser recebido pelo porto, além da demora nos procedimentos. Nesta ocasião formou-se uma fila de caminhões no porto para descarregamento, que chegou a mais de 120 km, com alguns navios esperando até 60 dias no porto (FOLHAONLINE, 2004).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2004) as perdas nas etapas de pós-colheita dos grãos, acontecem principalmente no transporte dos grãos, em função das más estradas, acondicionamento inadequado dos grãos nas carretas, além do armazenamento no limite da capacidade. As perdas no transporte chegam a 8,8% da safra 04/05 (aproximadamente 10 milhões de toneladas).

2.3.2 Recepção

É comum os grãos, após serem colhidos, seguirem para as etapas de pós-colheita fora da propriedade em que foram produzidos. Os grãos recém-colhidos seguem para os armazéns coletores, onde é realizada a amostragem e classificação dos grãos, depois são direcionados para pesagem e finalmente para as próximas etapas (pré-limpeza, secagem, armazenamento).

O recebimento de um produto agrícola é um dos pontos mais críticos de sua comercialização, pelo fato do produtor poder ser penalizado quando a umidade de chegada e os avariados¹⁷ excedem os limites máximos permitidos pelas unidades de pré-processamento.

O processo de amostragem e classificação é dividido em: calagem, que é o

¹⁷ Grãos ou pedaços de grãos que se apresentam ardidos, brotados, imaturos, chochos, mofados ou danificados.

processo de coletar amostras representativas seguindo critérios estatísticos simples e essenciais, determinação de umidade e determinação de avariados.

As etapas finais de recepção são constituídas pelas balanças e pelas moegas (Figura 2) onde os caminhões descarregam seus lotes recentemente calados, classificados e pesados. As moegas devem permitir uma primeira separação entre os diferentes lotes, quer por faixa de umidade, quer por níveis de avariados ou outro critério qualitativo do produto (DALPASQUALE, 2002).

FIGURA 2 – MOEGA UTILIZADA PARA RECEPÇÃO DOS GRÃOS



2.3.3 Pré-limpeza e Limpeza

No Brasil, os armazéns coletores têm recebido a grande maioria dos grãos diretamente da lavoura. Junto com eles vêm outros materiais que devem ser removidos antes do armazenamento definitivo. Geralmente o processo de limpeza divide-se em duas partes: antes da secagem (pré-limpeza) e após a secagem (limpeza).

O processo de pré-limpeza tem como finalidade reduzir o nível de avariados na massa para menos de 4,0%, partindo de um lote com 8,0% de avariados. O processo de limpeza reduz este índice para menos de 1,0%, condição recomendável para armazenagem mais segura. As máquinas utilizadas nesses processos (Figura 3) são dimensionadas segundo os limites de avariados e teor de umidade de um determinado

tipo de grão. Para a pré-limpeza, os grãos devem estar na faixa de 18% de umidade, com até 8% de avariados e densidade do grão em torno de $0,75 \text{ ton/m}^3$. Com o aumento da umidade de chegada a capacidade dessas máquinas pode ser reduzida em até 40%.

O produto é separado de outros materiais pela ação de uma corrente de ar e por peneiras. O ar usado nas máquinas de pré-limpeza deve ser direcionado para um ciclone a fim de reter as partículas indesejáveis e para que o ar possa voltar ao ambiente com baixos índices de impurezas (DALPASQUALE, 2002).

Em seguida os grãos seguem para uma das mais importantes etapas da pós-colheita, que é a secagem.

FIGURA 3 – MÁQUINA DE PRÉ-LIMPEZA E LIMPEZA



NOTA: Máquina de Pré-Limpeza do LEIS

2.3.4 Secagem

É uma das etapas mais importantes da fase de pós-colheita de grãos, pois, uma vez realizada adequadamente, o grão adquire condições necessárias para armazenamento e extração de óleo.

Segundo DORETTI et al. (2003), a conservação das propriedades

nutricionais dos grãos pode ser influenciada por alguns fatores, entre eles: o meio ambiente, injúrias mecânicas, colheita precoce, ataques por agentes biológicos, contaminações e, principalmente, processos inadequados de secagem. Outros estudos como PUZZI (1986), HEUERT (2004), JAYAS E WHITE (2003) e SILVA (2005) também apontam para tais questões.

Após sua colheita, a soja apresenta certa quantidade de umidade e, por isso, deve ser seca para que não fique susceptível a fermentação e/ou germinação, e possa ser transportada e armazenada por longos períodos. Segundo a EMBRAPA (2004), a soja deve ser colhida em geral com umidade em torno de 18% b.u. (22 % b.s.). Para armazenagem e transporte ideal, a umidade remanescente no grão após o processo de secagem, irá depender das condições climáticas da região. No Canadá pesquisas (JAYAS E WHITE, 2003) apontam 14% b.u. (16,2% b.s.). No Brasil, segundo estudos (SILVA, 2005; HEUERT, 2004, EMBRAPA, 2004), a umidade deve ser 13% b.u. (15% b.s.). Para se obter uma secagem adequada dos grãos é necessário o uso de secadores mecânicos. Estes equipamentos vêm sendo muito estudados ao longo dos anos e podem ser classificados de acordo com os fluxos do ar de secagem e massa de grãos, e também, quanto à forma de funcionamento.

A classificação dos secadores quanto aos fluxos de ar de secagem e massa de grãos é estudada a muitos anos e periodicamente sofre atualizações, SILVA (2005), entre outros, revisou a classificação dos secadores e classificou-os em: leito fixo, fluxos cruzados, fluxos contracorrentes, fluxos concorrentes e fluxo misto.

Secadores de leito fixo: a camada de grãos permanece estática durante a secagem e, por isso, se faz necessário o revolvimento a cada 3 horas. Assim, a secagem do produto acontece uniformemente. Alguns fabricantes comercializam estes secadores com revolvimento mecânico, deixando o processo ininterrupto. É mais empregado para milho em espigas, feijão em ramas, café e arroz.

Secadores de fluxos cruzados: os fluxos de grãos e ar de secagem cruzam sob um ângulo de 90° na câmara de secagem. São secadores com duas câmaras de secagem. Na primeira, a superior, há um ventilador axial e, na segunda, dois. Junto aos

ventiladores existem os geradores de calor.

Secador de fluxos contracorrentes: os fluxos de grãos e ar de secagem ocorrem em sentidos contrários, sendo que o fluxo de grãos ocorre no sentido da gravidade e o fluxo de ar em sentido ascendente. À medida que ocorre a secagem, a camada de grãos seca é transportada para silos armazenadores ou é depositada na parte superior da massa de grãos. Para tanto, o sistema de movimentação de grãos é acionado por um termostato que monitora o avanço da frente de secagem.

Secador de fluxos concorrentes: os fluxos de ar de secagem e grãos têm o mesmo sentido de deslocamento. As configurações comerciais possuem grandes alturas, vários estágios de secagem e descanso, e circuitos de reaproveitamento do ar de secagem.

Secador de fluxos mistos ou secador tipo cascata: é o modelo de secador mais utilizado pelas unidades armazenadoras brasileiras, disponibilizado com capacidades de secagem de 10 a 300 ton/h. Possuem uma torre central montada pela superposição vertical de caixa de dutos. Uma caixa duto é formada por dutos em uma fileira horizontal. O nome cascata é definido devido à característica do movimento da massa de grãos por entre os dutos. Cerca de 1/3 da altura da torre é destinado à câmara de resfriamento, cujo objetivo é retirar calor da massa de grãos, deixando-a com temperatura adequada para armazenagem. Muitos secadores aproveitam o ar que sai da seção de resfriamento, misturando-o ao ar de secagem.

Já quanto à forma de funcionamento, PUZZI (1986), entre outros, classificou os secadores em: contínuos ou de carga.

Secador de Fluxo Contínuo: o grão entra úmido na parte superior e é descarregado seco e frio na parte inferior. A massa de grãos flui continuamente através do secador, um dispositivo regula o fluxo de grãos de acordo com a quantidade de carga a ser retirada. A faixa de umidade retirada em cada passagem é da ordem de 5%, e a capacidade deste varia de 10 a 300 toneladas/hora.

Secador de carga: secam uma determinada quantidade de grãos depositados em uma câmara, onde o ar é forçado por meio de um ventilador motorizado. Quando a

secagem de um lote ou carga estiver concluída, a massa de grãos é resfriada e o secador é reabastecido com grãos úmidos.

Depois de concluída a secagem, o queimador é desligado e o ventilador passa a ser usado para baixar a temperatura dos grãos antes de serem removidos do secador. Esta operação de resfriamento pode levar de 20 a 40% do tempo total de permanência dos grãos no secador, acarretando numa diminuição da capacidade diária do secador. Porém, isto pode ser evitado com a retirada dos grãos quentes para uma armazenagem ventilada.

Secador nos silos metálicos: um silo metálico com fundo falso pode ser usado como secador de carga. Os grãos são espalhados sobre o piso perfurado até 0,60 a 1,20m de altura, o ar quente é forçado através da massa por um ventilador junto a um aquecedor. Quando o lote estiver seco, é resfriado no próprio silo ou coloca-se os grãos quentes em outras células, onde são resfriados pelo sistema de aeração. Este método é muito utilizado nas fazendas dos Estados Unidos, principalmente levando em consideração o aspecto econômico.

O alto consumo de energia térmica na secagem, aliado ao regime de secagem, são motivos para realização de estudos para aumento da eficiência na secagem de grãos.

Atualmente, várias pesquisas vêm sendo realizadas com intuito de testar novas concepções de processos de secagem e uso de combustíveis na secagem de grãos. Alguns destes estudos são apresentados abaixo.

ARINZE et al. (1994) realizaram simulações do processo de secagem da canola utilizando diferentes fontes de energia térmica como: GN, propano, eletricidade, energia solar e combinação de energia solar e GN. Este trabalho, porém, considerou a secagem em silos e não em plantas típicas de secagem. Os autores concluíram que a energia solar apresenta um menor custo do que os outros combustíveis e que pode ser utilizada em regiões com grande incidência solar, acoplando coletores junto aos silos. A secagem utilizando GN e propano tiveram custos menores, para o caso onde o uso de fontes tradicionais de energia é preferido e

onde fontes renováveis não são convenientes.

SOPONRONNARIT et al. (2001), estudaram a secagem de soja por leito fluidizado e concluíram que a percentagem de grãos rachados e quebrados cresce proporcionalmente com a temperatura e tempo de secagem. Porém, a uma temperatura em torno de 140° C a percentagem de quebrados se torna constante. Através de suas simulações chegaram a parâmetros ideais para secagem de soja utilizando fluidização, os quais são: temperatura de secagem de 140° C, comprimento do leito de 18 cm, velocidade do ar de secagem em torno de 3 m/s e recirculação de ar de 90%. Nessas condições os percentuais de rachados e quebrados foram de 27% e 1,7%, respectivamente, capacidade de secagem de 4,65 ton/h e consumo de energia primária de 6,8 MJ/kg de água evaporada. Outro estudo sobre esta técnica de leito fluidizado pode ser encontrado em ÖZBEY (2005).

SRIVASTAVA e JOHN (2002), realizaram simulações do processo de secagem de grãos variando a altura de um leito fixo de grãos e concluíram que a secagem é mais eficiente quanto maior a altura do leito.

PRACHAYAWARAKORN et al. (2004), realizaram estudo comparativo entre alguns processos de secagem de soja, como secagem em leito fluidizado (escala industrial), em leito de jorro (laboratório), extrusão (escala comercial) e radiação infravermelha (tanto em laboratório quanto em escala industrial). Concluíram que a secagem com essas alternativas são satisfatórias para inativação da urease (enzima que transforma vapor + urea em CO₂ e NH₃). Na análise da proteína solúvel as quatro técnicas mostraram grandes diferenças: a secagem por infravermelho mostrou o melhor resultado para solubilidade de proteínas (78-89%), já a extrusão apresentou o pior resultado (74–78%); a quantidade de lisina (aminoácido presente na maioria dos grãos) restante foi igual para todas as técnicas e a extrusão consumiu maior quantidade de energia seguida pelo leito fluidizado.

CHEMKHI et al. (2004), estudaram a secagem de grãos usando energia solar. Para simular o funcionamento de um coletor solar foi utilizado um modelo simples baseado na avaliação de diferentes coeficientes de transferência de calor.

Concluíram neste estudo que a eficiência do coletor solar é baixa para as condições normais do ambiente, da ordem de 10 a 15%. Porém, com aumento do fluxo da massa de ar ambiente, a eficiência do coletor sobe para a faixa de 50 a 60%.

Os estudos acima, mostram que o processo de secagem vem cada vez mais sendo estudado, porém, de forma não integrada com as outras etapas de pós-colheita de grãos.

2.3.5 Armazenamento

A armazenagem de grãos é uma técnica tradicional que vem sendo estudada por muitos anos. CROTTY (1979), pesquisou a importância da redução das perdas no armazenamento de grãos originadas por parasitas. Técnica esta, estudada e revisada até os dias atuais. DAI et al. (2002), estudaram a geração de frio para resfriamento dos grãos armazenados através de energia solar, analisando uma área de coletor solar de 20 m². Para isto, utilizaram modelagem matemática e concluíram que este tipo de resfriamento é uma técnica aceitável, tanto do ponto de vista técnico como econômico. BIAGI et al. (2002), estudaram as formas tradicionais de armazenagem de grãos, que podem ser feitas de duas formas: a granel (sem embalagens) ou acondicionada em volumes (sacarias). Verifica-se um aumento da primeira opção em relação à armazenagem em sacarias, isto se deve as inúmeras vantagens que o método a granel apresenta sobre o de sacaria.

Alguns fatores são importantes para a escolha e implantação de uma unidade armazenadora, tais como: localização e mercado de influência; aspectos técnicos, econômicos e operacionais; finalidade a que se destina a unidade; custo de instalação e operação; estudo planialtimétrico (declividade e relevo do terreno, rochas e lençol freático) (BIAGI et al., 2002).

Para um armazenamento mais adequado, é necessário que se instalem silos e armazéns de diferentes tamanhos e capacidades, devido a variedade (quantidade e qualidade) dos produtos produzidos a cada ano.

Unidades armazenadoras para grãos ensacados:

Armazéns: também chamados de armazéns convencionais, são construções de fundo plano, pé direito elevado e de comprimento único, projetadas para receber produtos ensacados para armazenagem. Sua construção geralmente é de alvenaria, estrutura metálica, ou mista.

Armazéns estruturados: auto sustentado, constituído de armação de ferro montada e fixada ao solo, coberta de lona plástica. As laterais também são de lona com uma porta em cada cabeceira. O piso é de tela forrado com capim ou casca de arroz. Só deve ser usado para curto período de tempo devido às más condições de armazenagem propiciadas aos grãos.

Armazéns infláveis: seu sistema necessita de insuflação de ar para manter a lona plástica que constitui o armazém, é necessário contínuo funcionamento de ventiladores e pode sofrer danos quando instalados em regiões com grande influência de ventos.

Unidades armazenadoras para grãos a granel

Silos: unidades armazenadoras de grãos, caracterizadas por células ou compartimentos estanques, que possibilitam o mínimo de incidência ou influência entre o meio externo e o ambiente de estocagem. Os silos oferecem condições de armazenagem por períodos mais longos do que os armazéns, pois possibilitam um controle de fontes de deterioração mais eficiente.

Verticais: nestes silos as dimensões da altura são predominantes sobre as dimensões da base do silo, por isto a denominação. Geralmente, são construídos em concreto armado ou chapas metálicas, quase sempre em forma cilíndrica, evitando assim o acúmulo de material em cantos, e facilitando a limpeza, aeração e movimentação de grãos.

Horizontais: neste caso predomina a relação da base sobre a altura. Estes silos possuem ao longo do seu comprimento compartimentos de estocagem, cada um deles com capacidade de armazenagem não superior a 2% da capacidade total do silo. Deve-se atentar para que estes compartimentos sejam estanques, sem interferência

entre cada um. Os fundos destes silos, ou dos compartimentos, podem ser em forma de “V” ou duplo “V” para facilitar a movimentação dos grãos, e o seu material de construção deve ser de concreto armado ou pré-moldado.

Baterias de silos: conjunto de silos individualizados ou agrupados em torno ou ao lado de uma central de pré-processamento. Solução que pode ser utilizada para propriedades em expansão ou no aumento da produção. Estes silos podem ser de capacidades diferentes e serem acoplados a bateria conforme as necessidades reais de armazenagem.

Armazéns Graneleiros: são unidades armazenadoras de grande capacidade, construídas em concreto. A estocagem se desenvolve no sentido horizontal. A massa de grãos geralmente é dividida por células de mesmo tamanho. O fundo pode ser em forma de “V”, “W”, semi V ou plano, dependendo das características do solo e lençol freático. Os armazéns graneleiros possuem fitas transportadoras superiores e inferiores para efetuar a carga e descarga dos grãos. Devido ao pequeno número de depósitos, possuem pequena versatilidade, devendo sempre ficar situados junto a uma bateria de silos.

Armazéns granelizados: é a adaptação do armazém convencional para operar com produto a granel, aumentando a sua capacidade estática. Esta adaptação é feita reforçando as paredes laterais, corrigindo as falhas do piso e, em muitos casos, adaptando um sistema de aeração. Pode ser utilizado o sistema chamado piscina, onde são colocadas pilhas de produtos ensacados em todas as laterais e produto a granel no centro (BIAGI et al., 2002).

Tendo em vista a grande quantidade de grãos que necessitam de armazenamento no Brasil e a questão logística do transporte e dos armazéns do país, surge um dos principais problemas do setor agroindustrial brasileiro, o déficit de capacidade de armazenagem.

2.4 DESCRIÇÃO DE UMA PLANTA TÍPICA DE SECAGEM

O secador descrito neste item é o mais encontrado nas unidades de processamento no Brasil e foi utilizado no estudo de ERRERA et al. (2003).

Geralmente os secadores podem operar de 10 à 300 ton/h de soja e milho. No estudo citado, o regime de operação do secador foi estabelecido para 100 ton/h.

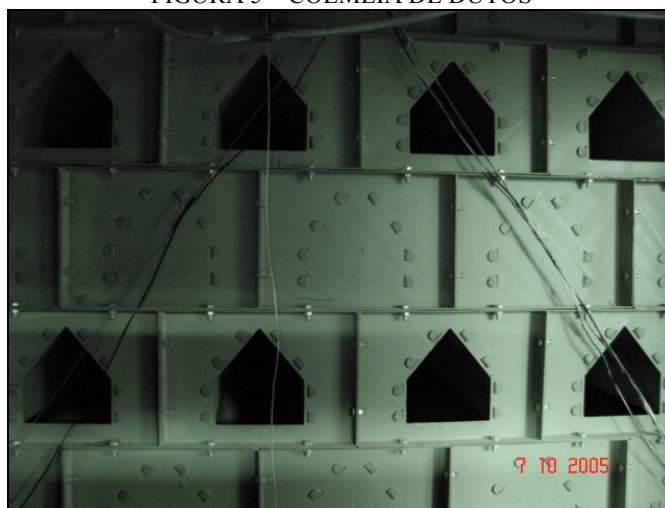
Os grãos não devem permanecer por longos períodos com a umidade oriunda do campo, pois são passíveis de fermentação, respiração ou germinação. Por outro lado, o manuseio e a secagem de grãos, em um processo rápido, podem ocasionar injúrias mecânicas e térmicas nos grãos.

Os ciclos de secagem são criteriosamente estabelecidos para cada tipo de grão e o processo é controlado mecânica e termicamente. Por exemplo, recomenda-se que a temperatura de secagem seja em torno de 60° C para soja.

A soja deve ser colhida com umidade de 18% e ser seca até uma faixa de 13% (EMBRAPA, 2004). A energia térmica utilizada para secar 100 ton/h de soja gira em torno de 17 GJ/h (4.652 kW) e mais 65 kW de eletricidade (ERRERA et al., 2002).

O secador mais utilizado possui núcleo formado por uma colméia de dutos horizontais perfurados para a passagem do ar quente (Figura 5).

FIGURA 5 – COLMÉIA DE DUTOS

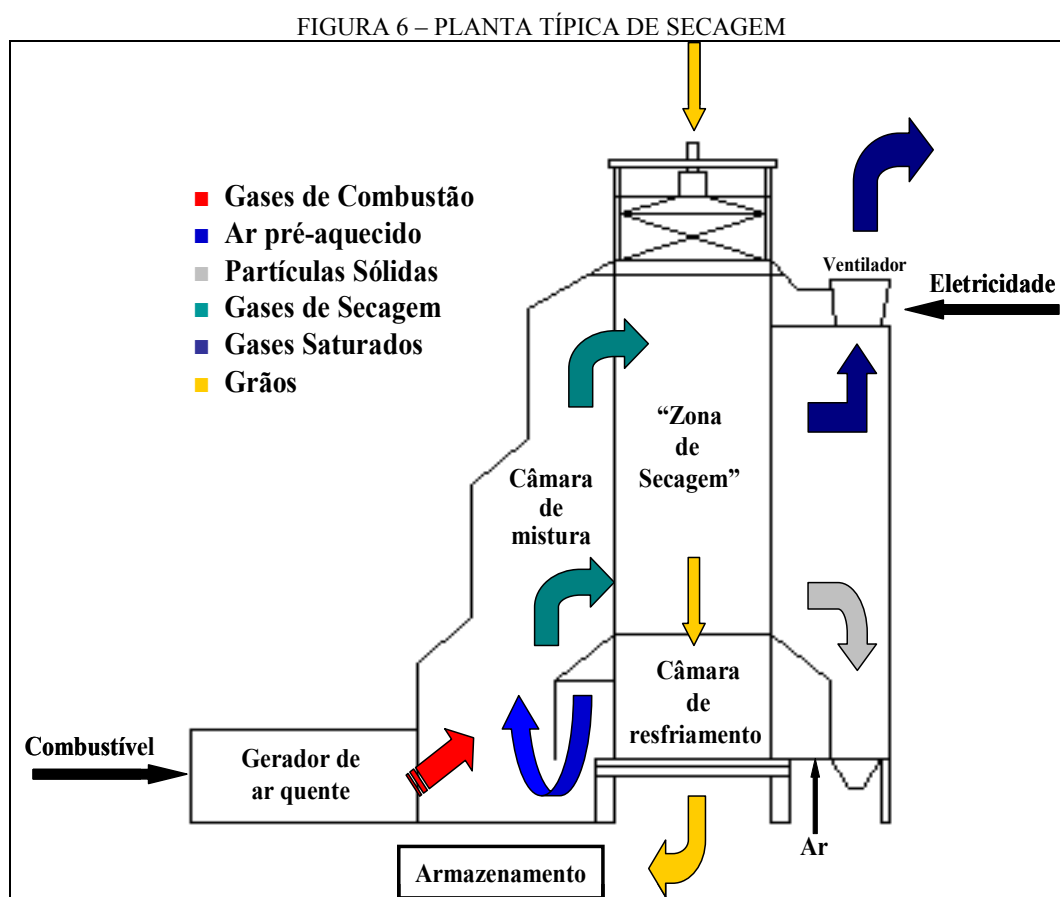


Os grãos são carregados no topo do secador e descem por gravidade

atravessando a pilha de dutos. Na sequência, uma outra pilha é dedicada para a câmara de resfriamento, onde o ar ambiente é pré-aquecido enquanto está resfriando a soja seca. Estudos (e.g. SILVA, 2005) mostram que a soja não deve deixar o secador acima de 5° C da temperatura ambiente, por causa da possibilidade de re-absorção de umidade pelo grão, comprometendo assim o potencial de armazenamento.

O ar de secagem pode ser preparado através da queima de combustíveis, aquecimento elétrico e solar, sendo o primeiro tipo mais utilizado.

A Figura 6 mostra as principais características da planta de secagem descrita acima. As setas largas indicam o fluxo de ar. O ar ambiente entra no secador, simbolizado pela seta fina e preta, e a soja, simbolizada pela seta amarela, é misturada com os gases quentes de combustão.



O secador mostrado na Figura 6, também chamado de tipo “cavalete” é o mais utilizado nas plantas de secagem do Paraná (ERRERA et al., 2002).

Alguns estudos sobre eficiência exergética destas plantas serão descritos no item 2.5.9.

2.5 CONSIDERAÇÕES AMBIENTAIS E ENERGÉTICAS

Segundo o órgão americano Energy Information Administration (EIA, 2002), o consumo de energia primária mundial, em 2002, foi de aproximadamente $433,75 \times 10^6$ TJ. Aumentando cerca de 3% em relação ao ano de 2000, que era de $420,99 \times 10^6$ TJ. De acordo com o mesmo relatório, no Brasil o consumo total de energia primária em 2002 foi de $9,04 \times 10^6$ TJ, valor próximo da média mundial.

Como particularidade do setor energético brasileiro, pode-se indicar a alta porcentagem correspondente ao consumo de fontes renováveis (hidroeletricidade, lenha, produtos da cana-de-açúcar, entre outros) (LORA, 2002).

O Estado do Paraná, em 2003, consumiu 605.495,8 TJ de fontes primárias. No período de 1980 a 2003, a taxa anual de crescimento do consumo do Paraná foi de 3,4%, sendo que no último ano a variação foi positiva em 0,4%. Esta variação, é consequência do dinamismo da economia estadual em função das exportações e das atividades ligadas ao agronegócio (COPEL, 2005).

Abaixo estão informações sobre os principais combustíveis utilizados na fase de pós-colheita de grãos para atendimento da demanda térmica.

2.5.1 Lenha

Segundo MCKENDRY (2002), biomassa é o termo utilizado para todo material orgânico oriundo das plantas (incluindo algas, árvores, subprodutos agrícolas, entre outros), e inclui toda vegetação terrestre e aquática, assim como todos resíduos. De acordo com HALL e SCRASE (1998) o mundo deriva 20% de sua energia de fontes renováveis, sendo biomassa na faixa de 13-14% (considerando apenas uso de lenha legal) e hidroeletricidade 6%.

As florestas, por sua vez, são muito utilizadas por alguns setores industriais brasileiros, principalmente nas indústrias de produtos sólidos de madeira (madeira serrada e chapas de madeira), tornando-a a grande base do mercado de produtos florestais.

A área total coberta por florestas (natural e plantada) no mundo é aproximadamente 3,9 bilhões de hectares (ha), ou perto de 30% do território mundial. A América do Sul e a Rússia têm as maiores áreas cobertas do mundo, 886 e 851 milhões ha, respectivamente. Somente o Brasil possui 544 milhões de ha (FAO, 2001).

De acordo com AHMED et al. (2005), aproximadamente 72 milhões de ha do território mundial são de florestas plantadas para lenha, ou seja, 2% do total mundial.

A floresta Amazônica brasileira é uma das mais extensas florestas do mundo, porém, em algumas regiões o desmatamento é um grande problema. Isto vem sendo noticiado pela imprensa nacional e órgãos federais. Como exemplo disto, destaca-se a publicação do governo federal no dia 18/05/2005 sobre o desmatamento no Estado do Mato Grosso (dados produzidos pelo monitoramento do Sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Real (DETER), vinculado a Coordenação-Geral de Observação da Terra (OBT)). Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2003) em 2001 o total desmatado era aproximadamente 608 km², mais que 10% de toda a Floresta Amazônica. O desmatamento no Estado do Paraná já não é muito preocupante, pelo fato de que não restam grandes quantidades de florestas nativas, as que hoje existem são na maioria áreas de preservação. Portanto, o atual consumo de lenha do Paraná é suprido, em grande parte, por áreas de reflorestamento.

Para os dados de consumo de lenha do Estado do Paraná utilizou-se o Balanço Energético do Paraná (BEP), ano base 2003. Segundo o BEP, o Estado consumiu cerca de 105.000 TJ de lenha e resíduos em 2003, chegando a aproximadamente a 17,5% na sua matriz energética.

ERRERA et al. (2002) apontam que a biomassa na forma de lenha é considerada a principal fonte primária de energia para o processo de secagem de grãos

no Paraná, sendo responsável por 85% da demanda termo-energética, totalizando 1.785 TJ na safra 04/05.

HALL e SCRASE (1998) realizaram uma avaliação sobre o papel da biomassa no futuro e chegaram à conclusão que será um dos principais combustíveis ambientalmente amigáveis, devido entre outros fatores, ao seqüestro de carbono (metodologia recomendada pela Convenção das Nações Unidas em Mudança Climática).

Para os cálculos das áreas de reflorestamento necessárias para suprimento da demanda energética nos cenários desenvolvidos neste trabalho utilizaram-se duas espécies de madeira (eucalipto e bracatinga). O eucalipto é a espécie mais utilizada no pré-processamento de grãos (informação coletada através das visitas de campo).

Segundo PEREIRA et al. (2000) o gênero *Eucalyptus* compreende um grande número de espécies, que permite a substituição de várias espécies latifoliadas nativas. No entanto, poucas espécies têm sido plantadas em escala comercial. A Tabela 1 mostra as principais espécies do gênero *Eucalyptus* plantadas no Brasil.

A bracatinga por sua vez é uma espécie típica de regiões de clima frio do Brasil, conseqüentemente sendo predominante na região sul do país. Possui ciclo de crescimento em torno de 6 anos e tem grande uso na geração de energia, devido ao seu alto poder calorífico de 19,12 MJ/kg (ANGELI, 2003).

Algumas informações importantes da bracatinga:

- Família: Mimosaceae (Leguminosae – Mimosoideae);
- Espécie: *Mimosa scabrella* Bentham;
- Sinonímia botânica: *Mimosa bracaatinga* Hoehne;
- Nomes vulgares: abracatinga, anizeiro, bracatinga, paracatinga, mandengo.
- Planta hermafrodita;
- Espécie florestal heliófila.

TABELA 1 - PRINCIPAIS ESPÉCIES DE EUCALYPTUS PLANTADAS NO BRASIL

ESPÉCIES	LOCAL DE PLANTIO
<i>E. alba</i>	Brasilândia – MG
<i>E. benthamii</i>	Colombo - PR
<i>E. botryoides</i>	Pelotas - RS
<i>E. camaldulensis</i>	Morada Nova, Brasilândia, Uberaba – MG
<i>E. citriodora</i>	Uberaba – MG
<i>E. cloeziana</i>	Brasilândia, Uberaba - MG
<i>E. dalrympleana</i>	São Francisco de Paula – RS
<i>E. deanei</i>	Capão Bonito – SP; Pelotas, São Francisco de Paula – RS
<i>E. denticulata</i>	São Francisco de Paula – RS; Colombo - PR
<i>E. dunnei</i>	Colombo – PR; Capão Bonito - SP
<i>E. fastigata</i>	Pelotas, São Francisco de Paula – RS; Capão Bonito - SP
<i>E. globulus</i>	São Francisco de Paula – RS
<i>E. grandis</i>	Capão Bonito – SP; Pelotas – RS; Uberaba – MG; Campo Mourão – PR
<i>E. maculata</i>	Uberaba – MG
<i>E. microcorys</i>	Uberaba – MG
<i>E. nitens</i>	Colombo, Irati – PR; São Francisco de Paula – RS
<i>E. nova-anglica</i>	São Francisco de Paula – RS
<i>E. obliqua</i>	São Francisco de Paula – RS
<i>E. pellita</i>	Brasilândia, Morada Nova, Uberaba - MG
<i>E. pilularis</i>	Uberaba – MG
<i>E. propinqua</i>	Capão Bonito – SP; Uberaba - MG
<i>E. regnans</i>	São Francisco de Paula – RS
<i>E. saligna</i>	Capão Bonito – SP; Pelotas – RS; Uberaba - MG
<i>E. seeana</i>	Pelotas – RS
<i>E. tereticornis</i>	Brasilândia, Uberaba, Morada Nova – MG
<i>E. urophylla</i>	Uberaba – MG
<i>E. viminalis</i>	Rio Branco do Sul, Irati – PR; São Francisco de Paula - RS

FONTE: PEREIRA et al. (2000)

2.5.2 Gás Natural

Um importante energético que vem sendo utilizado com maior frequência no Brasil é o gás natural (GN). Assim como o petróleo, ele é o resultado da transformação de fósseis de antigos animais e plantas que existiram na pré-história e é constituído, em sua maior parte, por metano (CH₄).

Segundo ALONSO et al. (2005) pesquisas recentes realizadas pelo setor de planejamento do Ministério de Minas e Energia (MME) associadas com prováveis cenários para o crescimento da indústria brasileira para o período de 1998-2010, claramente mostram o importante papel reservado ao GN como uma alternativa energética.

Estimativas da ANP apontam que o GN será responsável por 12% da matriz energética depois do ano 2010. Atualmente as reservas brasileiras chegam a 326,1

bilhões de m³, sofrendo um aumento de 32,9% em relação a 2003 (ANP, 2005a).

A participação de GN na matriz energética brasileira é possível, entre outros fatores, devido à disponibilidade deste recurso nos países vizinhos do Brasil, como Bolívia e Argentina (ROSA et al., 1995), da conclusão de 3150 km do gasoduto Bolívia-Brasil e ainda em função da recente descoberta de reservas na Bacia de Santos (PASSOS, 1999).

O Estado do Paraná possui uma reserva total de gás natural de 732 e 1.483 milhões de m³ na terra e mar, respectivamente (ANP, 2005a), e o consumo em 2003 foi de 11.000 TJ, em torno de 2% do total de energia consumida no período (COPEL, 2004).

Em estudo realizado por ERRERA et al. (2002) na planta de secagem do Laboratório de Eficiência Energética e Exergética na Indústria da Soja (LEIS), a média de consumo de GN para secagem de soja é da ordem de 7 Nm³/ton¹⁹ de soja seca, considerando-se algumas imperfeições no secador. Este valor pode sofrer pequenas variações de acordo com o tipo de tecnologia de secagem, eficiência da combustão, entre outros fatores menores.

2.5.3 Gás Liquefeito de Petróleo

O gás liquefeito de petróleo (GLP) pode ser originado a partir do gás natural ou óleo cru. Apesar de ser constituído em sua maioria por propano e butano, incluem-se também diferentes tipos de hidrocarbonetos como propeno, iso-butano e n-butano em varias proporções.

Levando em consideração a possibilidade de armazenagem, transporte e manuseio na fase líquida, o GLP tem largo emprego tanto em aquecimento doméstico como industrial. Sua utilização como combustível se dá pelo seu alto poder calorífico, que é da ordem de 46.000 kJ/kg (CAMPOS e LEONTSINIS, 1989).

Nas refinarias do Estado do Paraná a produção de GLP em 2004 foi de

¹⁹ Nm³ = consumo de GN nas condições normais de temperatura e pressão.

2.118.802 kg (ANP, 2005b).

2.5.4 Óleo Diesel

O óleo diesel é um combustível derivado do petróleo, constituído basicamente por hidrocarbonetos. É um produto inflamável, medianamente tóxico, volátil, límpido, isento de material em suspensão e com odor forte e característico. O óleo diesel é utilizado em motores de combustão interna e por compressão (motores do ciclo diesel e turbinas de potência) empregados nas mais diversas aplicações, tais como: automóveis, furgões, ônibus, caminhões, pequenas embarcações marítimas, máquinas de grande porte, locomotivas, navios e aplicações estacionárias (geradores elétricos, por exemplo) (e.g. GASPETRO, 2005). Possui poder calorífico inferior de aproximadamente 38 MJ/l.

Segundo a ANP (2005b) o Estado do Paraná teve uma produção em 2004 de 4.590.927 m³ de óleo diesel.

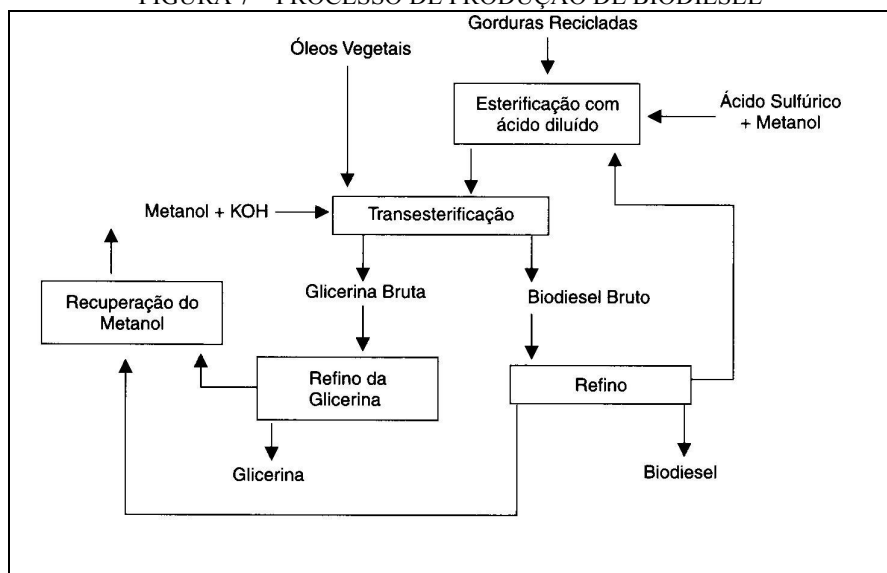
2.5.5 Biodiesel

Atualmente alguns energéticos vem cada vez ganhando espaço na matriz energética, entre eles está o biodiesel. Segundo RAMOS et al. (2000) biodiesel é um derivado mono-alquil éster de ácidos graxos de cadeia longa, proveniente de fontes renováveis como óleos vegetais ou gordura animal. O biodiesel é obtido através de um processo de transesterificação, no qual ocorre a transformação de triglicerídeos em moléculas menores de ésteres de ácidos graxos (Figura 7). Sua utilização está associada à substituição de combustíveis fósseis em motores de ignição por compressão (motores do ciclo Diesel), e pode ser usado puro a 100% (B100), em mistura com o diesel de petróleo (B20), ou numa proporção baixa como aditivo de 1 a 5%. Enquanto produto, pode-se dizer que o biodiesel tem as seguintes características: maior viscosidade e maior ponto de fulgor que o diesel convencional, e está diretamente associado a atividades agrícolas. Possui poder calorífico inferior em torno

de 32 MJ/l.

Como o biodiesel é um combustível oriundo de fontes renováveis, possui baixas emissões totais de gases de efeito estufa (GEE), principalmente quando considera-se o ciclo de vida do combustível e potencial de sequestro de carbono.

FIGURA 7 – PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL



FONTE: HINRICHS E KLEINBACH (2003)

2.5.6 Características Físico-ambientais do Estado do Paraná

As informações abordadas neste tópico são importantes para o contexto deste trabalho, uma vez que mostram o perfil físico do Estado do Paraná onde foi realizado um estudo de caso. Os dados apresentados servem como base para avaliação da disponibilidade de novas áreas de reflorestamento, bem como, aumento da área agricultável, entre outros.

O Paraná faz parte do Planalto Meridional do Brasil, apresentando todas as características de clima subtropical úmido, na porção norte e na planície litorânea, e de clima subtropical, na porção sul do território, onde os invernos são mais rigorosos.

Em relação à geomorfologia o Estado dividi-se em: Litoral, Serra do Mar, primeiro Planalto, segundo Planalto e terceiro Planalto.

Em se tratando da declividade, o Estado está dividido da seguinte maneira:

- ✓ 0 a 10% (até 6 graus): corresponde a um relevo plano a suave ondulado;
- ✓ 10 a 20% (até 20 graus): corresponde a um relevo ondulado;
- ✓ 20 a 45% (até 24 graus): corresponde a um relevo fortemente ondulado e;
- ✓ superior a 45% (acima de 25 graus): são áreas aptas somente para o manejo florestal.

Originalmente, a cobertura vegetal do Estado do Paraná era constituída por grupos de domínios fitogeográficos das formações florestais, Floresta Estacional Semidecidual (FES), Floresta Ombrófila Mista (FOM) e Floresta Ombrófila Densa (FOD); e ainda aparecem, em menores proporções, as formações dos Campos Naturais, Cerrados, Vegetação de Várzea, Restinga e Mangues. Atualmente as áreas com cobertura vegetal do Estado estão reduzidas a menos de 8% da cobertura nativa original. (IPARDES, 2005; IAP, 2006).

2.5.7 Impactos Ambientais no Cultivo de Soja e Milho

Alguns estudos foram realizados à respeito dos impactos ambientais do cultivo de soja e milho.

ORTEGA e MILLER (2000) realizaram uma avaliação emergética²⁰ do processo de produção da soja e chegaram à conclusão que a agricultura orgânica é mais sustentável. A agricultura química e de herbicidas requerem mais insumos não renováveis, colocando em risco a disponibilidade de recursos energéticos para as futuras gerações.

Contudo, é importante lembrar que, para produzir alimentos para toda a população mundial, é indispensável o uso de herbicidas e outros produtos químicos.

²⁰ De acordo com os mesmos autores, de uma forma resumida “esta metodologia surgiu da análise energética dos sistemas naturais usando como base a Termodinâmica. Ela resolveu o desafio da mensuração do conteúdo de energia dos fluxos provenientes da natureza (chuva, sedimentos, biomassa, energéticos fósseis, etc.) medindo toda a energia que a biosfera usa para produzir esses recursos, em termos de energia solar equivalente”.

ALLMARAS et al. (1998) estudaram a redução dos impactos ambientais causados pelo cultivo do milho e soja, aplicando uma técnica de cultivo largamente utilizada para o preparo da semeadura acima do nível do solo. Esta técnica consiste em valas cavadas entre as fileiras de plantas, onde são colocados os resíduos do plantio (matéria orgânica) evitando assim a erosão do solo pelo vento e água, devido a melhor absorção do solo. Ao final do estudo concluíram que esta técnica é bastante eficaz para solos com pouca ou média drenagem, além de ter mostrado uma melhoria na qualidade da água superficial, devido à redução de nutrientes (N e P) e herbicidas carregados pelo escoamento superficial.

FEARNSIDE (2001) em seu estudo mostrou a ameaça do cultivo da soja para o meio ambiente no Brasil. Avaliou a transformação de ecossistemas naturais em áreas de cultivo de soja, considerando as perdas para o meio ambiente e sociedade, como, por exemplo, desmatamento, erosão, compactação do solo em função do alto nível de mecanização, redução da biodiversidade, contaminação do ambiente e seres humanos pelos agrotóxicos, além do remanejamento da população residente em áreas propícias ao plantio, etc. O autor conclui que esses impactos sócio-ambientais podem ser mitigados se políticas públicas forem implantadas, como: áreas de proteção nas fronteiras agrícolas, estudos dos custos ambientais e sociais da expansão da soja, criação de mecanismos para impedir a instalação de projetos com grandes impactos ambientais.

A produção de grãos pode também causar impactos indiretos no ciclo hidrológico, pois, como a lenha é o combustível mais utilizado para secagem de grãos, as grandes áreas de reflorestamento interferem no regime hidrológico.

2.5.8 Impactos Hidrológicos de Áreas de Reflorestamento

O ciclo hidrológico é caracterizado pelo comportamento natural da água quanto a sua ocorrência, transformação de estado e relações com a vida humana. Ele compreende, principalmente, as fases terrestres e atmosféricas, que incluem o

armazenamento temporário da água, transporte e mudança de estado.

Segundo TUNDISI (2001), os fatores que impulsionam o ciclo hidrológico são a energia térmica solar, a força dos ventos, que transportam vapor d'água para os continentes, a força da gravidade responsável pelos fenômenos da precipitação e da infiltração e deslocamento das massas de água. Basicamente os componentes do ciclo hidrológico são: evaporação, precipitação, evapotranspiração das plantas, infiltração e escoamento subterrâneo.

Precipitação atmosférica

Segundo GARCEZ e ALVAREZ (2002), entende-se por precipitação atmosférica o conjunto de águas originadas do vapor de água atmosférico que cai, em estado líquido ou sólido, sobre a superfície da terra. Dessa forma, engloba não somente a chuva, mas também a neve, granizo, nevoeiro, sereno e geada.

A precipitação atmosférica é formada através de uma expansão adiabática que age sobre o ar quente e úmido, resfriando-o e permitindo que atinja seu ponto de saturação.

Escoamento subterrâneo

O escoamento subterrâneo compreende a infiltração e conseqüente formação de águas subterrâneas. A infiltração provém das precipitações que ficam retidas no terreno ou que escoam superficialmente, infiltrando no solo por efeito da gravidade ou de capilaridade.

Segundo WANIELISTA (1990), a taxa e quantidade de água que infiltra no terreno é uma função dependente do tipo de solo, umidade do solo, permeabilidade do solo, cobertura vegetal, condições de drenagem, profundidade do lençol freático, intensidade e volume de precipitação.

Segundo GARCEZ e ALVAREZ (2002) a influência da infiltração devido a cobertura vegetal depende do tipo de vegetação, seu estágio de desenvolvimento, tipo de espécie e do tratamento dado ao terreno no caso de áreas cultivadas.

Escoamento superficial

De acordo com os mesmos autores citados acima, a partir do momento em que foi excedida a capacidade de retenção da vegetação e do solo e a superfície do solo já estiver saturada, passa a haver escoamento superficial.

O escoamento superficial compreende o conjunto das águas que, por efeito da gravidade, se desloca na superfície da terra para cotas mais baixas, formam pequenos filetes que tendem a se unir e formar cursos de água.

Portanto engloba desde uma gota de chuva que tomba sobre o solo saturado ou impermeável e escorre superficialmente, até o grande curso de água que desemboca no mar.

Evapotranspiração

Segundo WANIELISTA (1990), a evapotranspiração é a soma total da água que retorna para a atmosfera originada da superfície, água do solo, geleiras, neves, e da vegetação.

De acordo com TUNDISI (2001), em áreas florestadas, além da transpiração, as perdas de água podem ocorrer também por evaporação direta da água do solo, das superfícies líquidas e, quando chove, da interceptação.

Em áreas de reflorestamento outra perda de água do solo ocorre devido ao consumo pelas espécies florestais. Segundo IPEF (2003), o eucalipto consome do solo durante o ciclo de crescimento, na faixa de 800 a 1200 l de água por m² por ano. Já para culturas como do milho, por exemplo, este valor cai para cerca de 400 a 800 l de água por m² de solo. Estes dados apontam para possíveis impactos ambientais que plantações de eucalipto podem proporcionar ao ciclo hidrológico.

2.5.9 Uso Racional de Fontes Primárias de Energia

Com o acelerado crescimento populacional, o mundo necessita cada vez mais de energia para produção de bens e alimentos. Porém, esta energia nem sempre está disponível no estado adequado para o seu uso, necessitando assim, de tecnologias

de conversão. A Tabela 2 apresenta alguns exemplos de conversão de energia.

HINRICHS E KLEINBACH (2003), LORA (2002), BRAGA et al. (2002), entre outros, as formas de energia existentes são: química, nuclear, radiante, térmica, elétrica, mecânica (cinética e potencial) e as fontes de energia primária dividem-se em: carvão, gás natural, urânio-nuclear, sol-radiante/solar.

TABELA 2 – EXEMPLO DE CONVERSÃO DE ENERGIA

	Para Química	Para Elétrica	Para Calor	Para Luz	Para Mecânica
De Química	Fábricas de alimento	Bateria, célula a combustível	Fogo, alimentos	Vela, fosforescência	Foguete, músculo, animal
De Elétrica	Bateria, eletrólise, eletrodeposição	Transistor, transformador	Torradeira, lâmpada térmica, vela de carro	Lâmpada fluorescente, diodo emissor de luz	Motor elétrico, relê
De Calor	Gaseificação, vaporização	Termopar	Bomba de calor, trocador de calor	Fogo	Turbina, motor a gasolina, motor a vapor
De Luz	Fotossíntese, filme fotográfico	Célula solar	Lâmpada térmica, irradiador solar	Laser	Abridor de portas, fotoelétrico
De Mecânica	Célula de calor (cristalização)	Gerador, alternador	Freio de fricção	Faísca de pedra	Volante, pêndulo, roda d'água

FONTE: HINRICHS E KLEINBACH (2003)

Ao se analisar a fonte de energia (compatibilidade entre fonte/demanda), pode-se perceber se a energia está sendo racionalmente aproveitada. Por exemplo, o uso de uma resistência elétrica para geração de ar quente para secagem de grãos é uma incompatibilidade entre o uso final e a fonte energética, pois, a energia elétrica gasta neste processo poderia ser usada para fins mais nobres (iluminação residencial, alimentação de refrigeradores, alimentação de computadores, eletroeletrônicos de um modo geral, dentre outros). Diante disto, observa-se que apesar da energia não se perder e nem ser criada, esta pode ser degradada (e.g. KOTAS, 1985; WALL, 1986; MORAN, 1982). A racionalidade do uso da energia tem sido avaliada através o conceito de exergia.

Exergia (E) é o máximo de trabalho útil (de eixo ou eletricidade) obtido de um sistema que interage exclusivamente com o ambiente até atingir equilíbrio (e.g.

KOTAS, 1985; WALL 1986; BEJAN, 1997).

Na literatura de engenharia termodinâmica (e.g. BEJAN, 1997; KOTAS, 1985; WALL, 1986; MORAN, 1982), a exergia total de um sistema é composta pela exergia física, cinética, potencial e química, segundo a equação abaixo.

$$E = E^F + E^C + E^P + E^Q \quad (1)$$

Geralmente a exergia é expressa em unidade de massa ou base molar. Em base mássica a exergia é expressa como:

$$e = e^f + e^c + e^p + e^q \quad (2)$$

O balanço de exergia num volume de controle leva a:

$$\frac{dE_t}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_t - p_0 \frac{dV_t}{dt} + \sum_i \dot{m}_i e_i - \sum_e \dot{m}_e e_e - \dot{E}_D \quad (3)$$

onde os índices i e e são as entradas e saídas respectivamente do volume de controle considerado. O termo $\frac{dE_t}{dt}$ é a taxa de variação de exergia do volume de controle, \dot{Q}_j representa a taxa de transferência de calor do segmento (j) na fronteira do volume de controle onde a temperatura é T_j e a transferência de exergia associada é dada por

$$\dot{E}_{q,j} = \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \times \dot{Q}_j \quad (4)$$

onde, T_0 é a temperatura ambiente de referência. A exergia associada a interações do tipo trabalho é dada por

$$\dot{E}_w = \dot{W}_t - p_0 \frac{dV_t}{dt} \quad (5)$$

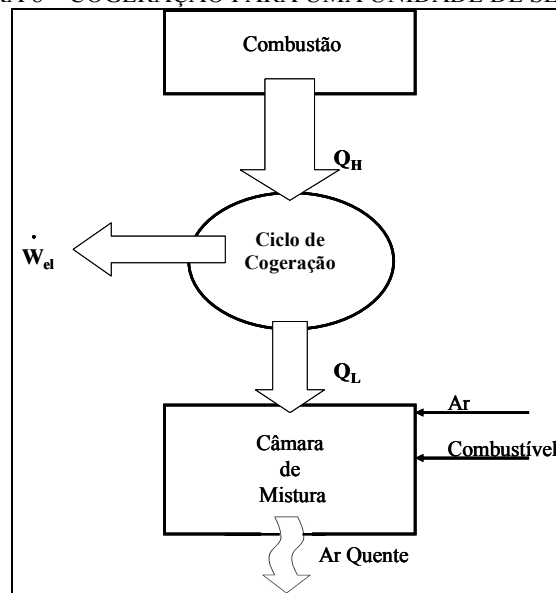
Para se obter respostas sobre a utilização racional da energia, realizam-se análises exergéticas com base no princípio de exergia, essas análises tiveram o intuito de identificar a destruição ou degradação dos fluxos energéticos.

Os primeiros trabalhos que abordaram a racionalidade de plantas de secagem foram ERRERA et al. (2002), FILIPINI et al. (2003) e STANESCU et al. (2003). Em

tais trabalhos foram realizadas análises exergéticas de plantas de secagem com utilização do GN e estudadas alternativas de compatibilização das fontes energéticas com a finalidade de secagem (ex.: cogeração).

BALESTIERI (2002), entre outros, aborda o tema cogeração em suas pesquisas. Entende-se como cogeração: “produção simultânea de diferentes formas de energia útil, como as energias eletromecânica e térmica, para suprir as necessidades de uma unidade de processo, seja ela do setor industrial, agrícola, terciário ou um sistema isolado, a partir de uma mesma fonte energética primária”. A Figura 8 ilustra o conceito de cogeração para uma planta de secagem. Após a combustão do combustível, o calor gerado segue para um ciclo de cogeração (a vapor, gás, combinado ou diesel). Neste ciclo, ocorre geração de eletricidade e, os rejeitos térmicos do ciclo de potência, são aproveitados para secagem de grãos.

FIGURA 8 – COGERAÇÃO PARA UMA UNIDADE DE SECAGEM



Os ciclos típicos utilizados para configurações de centrais de cogeração mostrados na Figura 8, geralmente são: ciclo a vapor (Rankine), ciclo a gás (Brayton), ciclo combinado (vapor e gás) e ciclo a diesel. Esquemas mais detalhados de unidades de secagem com cogeração são apresentados nas Figuras 9 a 11.

FIGURA 10 – CICLO A GÁS PARA UMA PLANTA DE SECAGEM DE GRÃOS

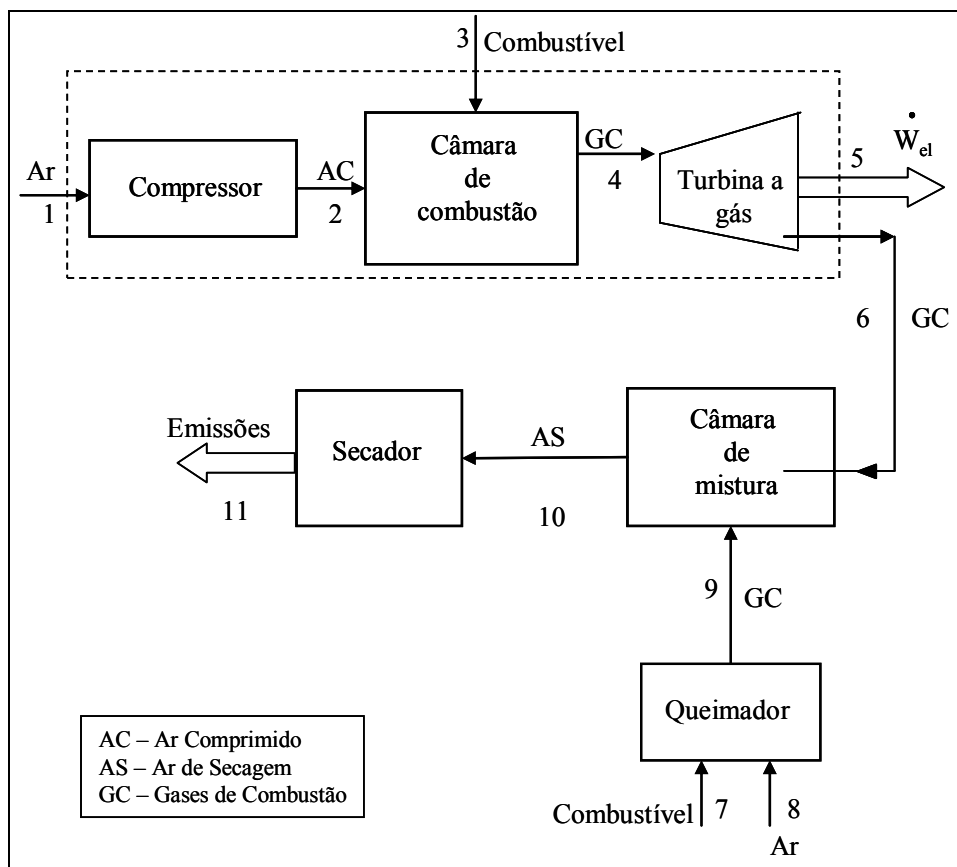
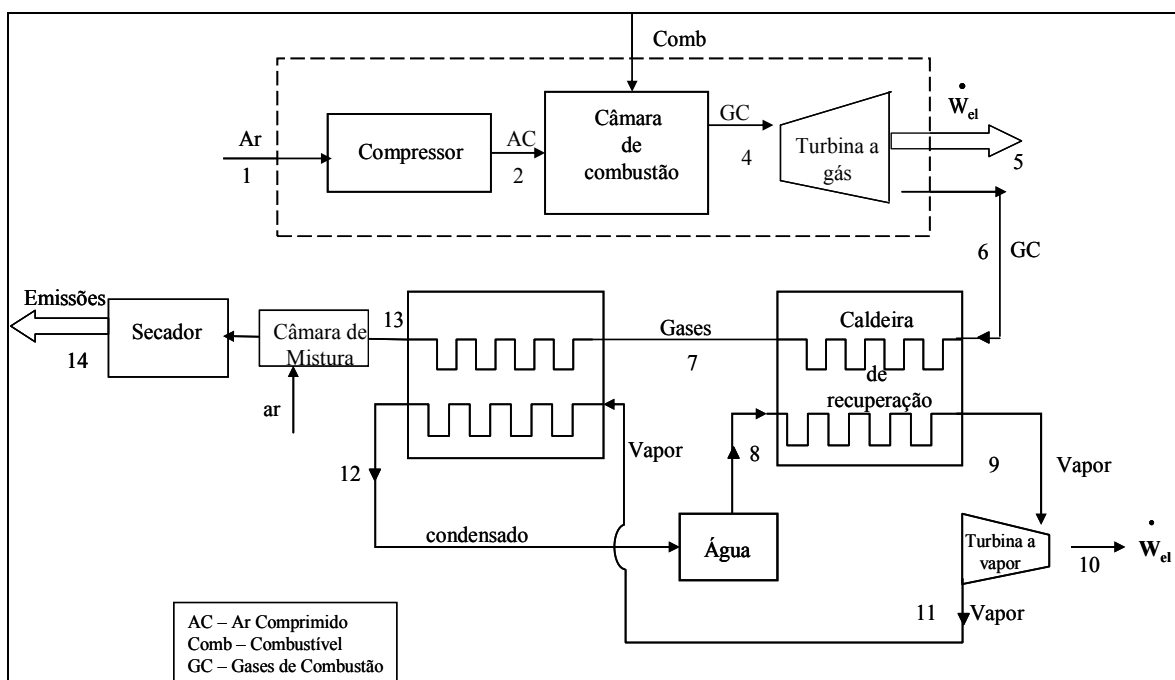
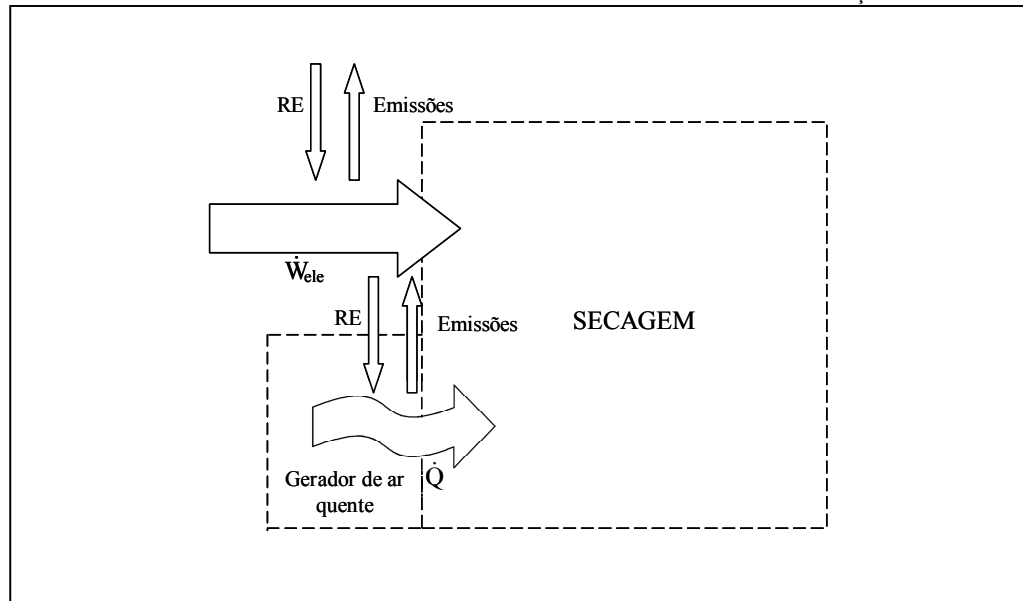


FIGURA 11 – CICLO COMBINADO PARA UMA PLANTA DE SECAGEM DE GRÃOS



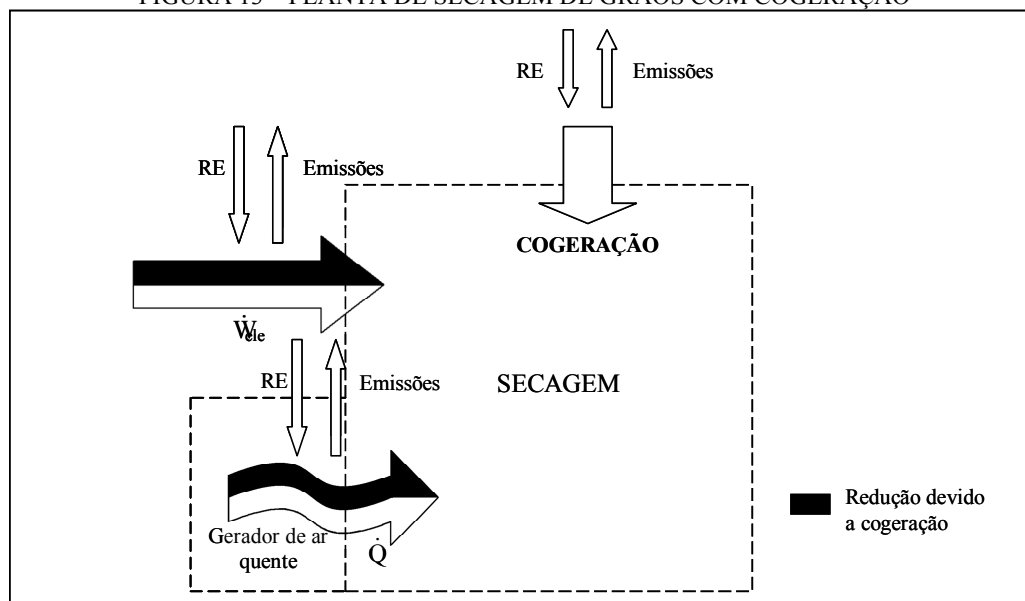
As Figuras 12 e 13 ilustram duas maneiras de utilização de recursos energéticos (RE) e de eletricidade em uma planta de secagem sem cogeração e com cogeração, respectivamente.

FIGURA 12 – PLANTA DE SECAGEM DE GRÃOS SEM COGERAÇÃO



Nota-se na Figura 13 a diminuição do consumo de recursos naturais para geração de energia térmica e elétrica, de forma separada, uma vez que, essas energias serão geradas simultaneamente com a cogeração.

FIGURA 13 – PLANTA DE SECAGEM DE GRÃOS COM COGERAÇÃO



Os estudos de ERRERA et al. (2002); STANESCU et al. (2003) e FILIPINI et al. (2003) demonstraram que secadores de grãos apresentam uma eficiência energética em torno dos 80%, enquanto a eficiência exergética de aproximadamente 5%. Estes resultados mostram a incompatibilidade do método de obtenção de energia térmica para secagem através da queima direta de combustíveis. Ou seja, os secadores são dispositivos dissipativos. Nestes casos observa-se a oportunidade de cogeração ou trigeração.

Cogeração e trigeração foram também estudadas nas referências citadas acima. A Tabela 3 mostra os valores obtidos nos estudos citados acima para a razão entre efeito elétrico sobre efeito térmico (β) para cada uma das configurações estudadas.

TABELA 3 - VALORES DE β PARA AS CONFIGURAÇÕES ESTUDADAS

CONFIGURAÇÕES DA PLANTA	EFEITO ELÉTRICO/EFEITO TÉRMICO ⁽¹⁾	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (%)	EFICIÊNCIA EXERGÉTICA (%)
Típica	-	76,52	5,17
Cogeração com micro turbinas Brayton	0,01	76,99	5,59
Trigeração com células a combustível e geração de frio	0,03	73,02	7,92

NOTA: (1) $\beta = \frac{W}{Q}$

FONTE: FILIPINI et al. (2003)

2.6 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

Como o desempenho ambiental de produtos e processos se tornou um problema-chave, várias empresas estão investigando caminhos de minimização de seus efeitos no meio ambiente. Companhias têm achado vantajoso explorar caminhos que não mais enfoquem as tecnologias de “fim-de-tubo”²¹, e sim utilizem estratégias de prevenção de poluição e sistemas de gerenciamento ambiental para melhorar seus

²¹ Tecnologias de fim de tubo: visam o tratamento dos resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões atmosféricas para atendimento dos padrões estabelecidos por lei. Não existe preocupação em redução de poluentes através do controle de processos. (CNTL, 2005).

desempenhos ambientais. Uma das ferramentas para se atingir este patamar é a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), mundialmente conhecida como *Life Cycle Assessment (LCA)*.

Entre as principais vantagens dessa nova concepção ambiental, estão: as contenções de custos com tratamentos de fim-de-tubo, melhoria da imagem da empresa perante a sociedade, e diminuição de atuações e multas pelos órgãos ambientais.

Segundo CURRAN (1996), a ACV é importante para identificar se um produto é melhor em comparação a outros e, também, para avaliar se modificações feitas em alguma parte de um sistema, resultam em diminuição dos impactos ambientais considerando todos os estágios do ciclo de vida.

Surgiu na década de 60, porém em função da grande necessidade de dados e da crise energética dos anos 70, poucos estudos foram feitos sobre ACV. O aumento das preocupações com questões ambientais e o melhoramento do desempenho de computadores foram responsáveis pelo aumento desta metodologia na década de 90 (CURRAN, 1996).

A ACV é conhecida por uma expressão chamada “berço ao túmulo”, ou seja, considera-se desde a extração da matéria prima da natureza para fabricação do produto e vai até o ponto em que toda a matéria retorna para a natureza. A ACV permite a estimativa do acúmulo de impactos ambientais de todas as fases do ciclo de vida do produto, geralmente incluindo impactos não considerados em análises tradicionais (matéria prima, extração, transporte de materiais, produto final, disposição final, etc.) (e.g. CURRAN, 1996; UGAYA, 2001; KORONEOS et al., 2005).

É uma técnica para avaliar todas as entradas e saídas de um produto, processo ou serviço (Inventário); avaliar os resíduos associados e seus impactos para a saúde humana e para ecologia (Avaliação dos impactos); e interpretar e comunicar os resultados da análise (Interpretação do ciclo de vida). A Figura 14 mostra as fases consideradas em uma ACV e as típicas entradas e saídas mensuradas.

Uma ACV é um processo sistemático constituído de quatro fases, que são:

- (i) *Definição do Objetivo e Escopo* – definição e descrição do produto, processo ou atividade. Estabelecimento do contexto na qual a avaliação será feita e a identificação dos limites e efeitos ambientais que a análise abrangerá.
- (ii) *Análise do Inventário* – Identificação e quantificação de energia, água, e materiais usados e os efeitos no meio ambiente (emissões atmosféricas, disposição de resíduos sólidos, descarga de águas residuárias).
- (iii) *Avaliação dos Impactos* – Avaliação dos efeitos sobre o ser humano e ecologia, originados pela energia, água e materiais usados e resíduos liberados, identificados na análise do inventário. Quatro etapas são usadas aqui: classificação, caracterização, normalização e quantificação.
- (iv) *Interpretação* – Avaliação dos resultados da análise do Inventário e avaliação dos impactos para selecionar o produto, processo ou serviço mais adequado, com um claro entendimento das incertezas e suposições utilizadas para gerar os resultados.

Detalhes e exemplos de LCA podem ser encontrados em CURRAN (1996), JOUTTIJÄRVI et al. (1998), BERG e LINDHOLM (2005), MOREIRA et al. (2006), LEONG et al. (2005).

Apresentam-se abaixo alguns estudos recentes de ACV sobre diversos assuntos relacionados a este tema.

KALTSCHMITT et al. (1997) realizaram uma ACV comparando o Metil Ester de Canola (biodiesel) com o óleo diesel e concluíram que as emissões do biodiesel foram menores em relação ao CO₂^{eq}, SO₂ e HCNM (hidrocarbonetos não-metano), além de que, o total do uso de energia primária em todo ciclo de vida ter sido menor para o biodiesel.

MATTSSON et al. (2000) utilizaram a metodologia de ACV para avaliar o uso da terra na agricultura, estudando três plantações de oleaginosas (soja, canola e

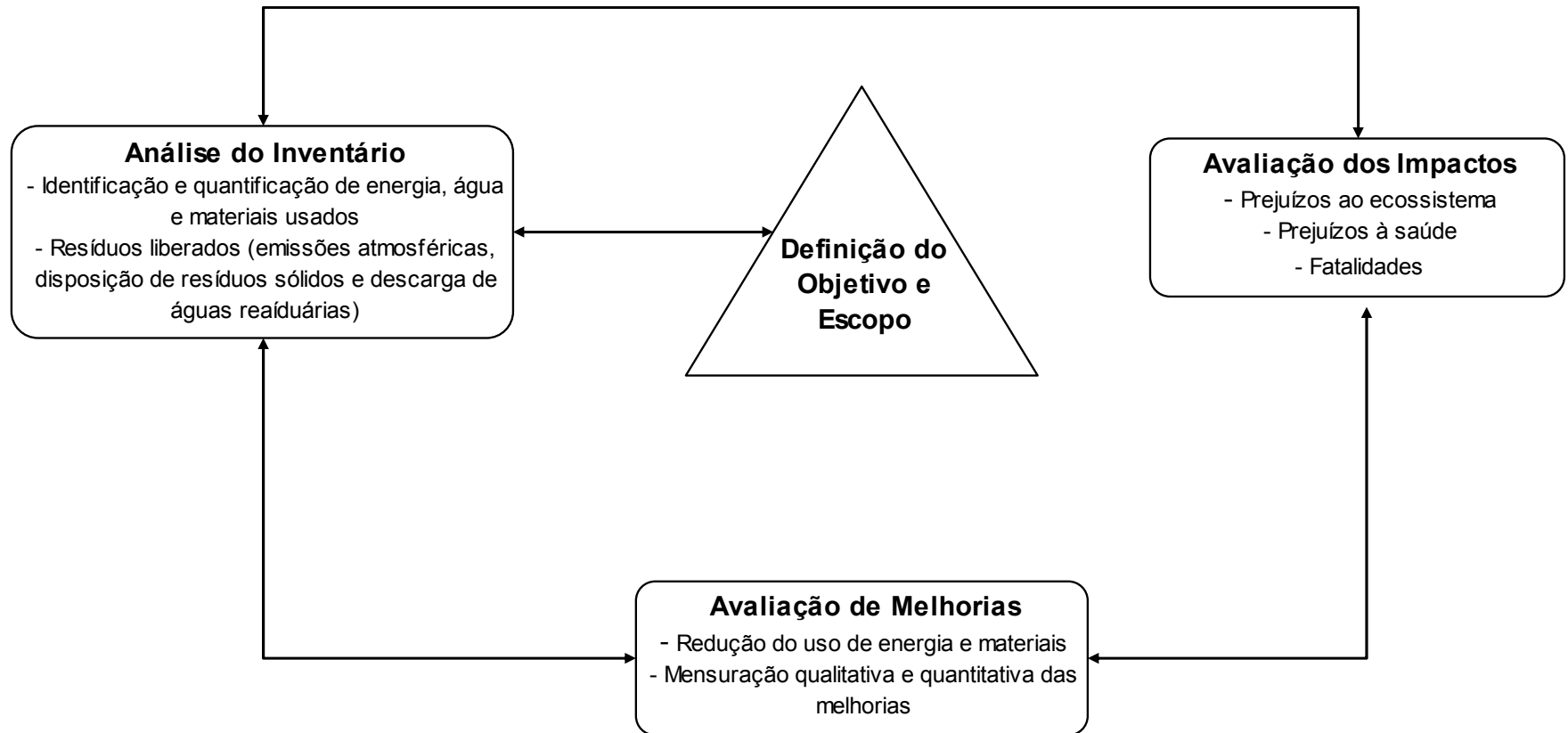
óleo de palma) e chegaram a resultados significantes no que tange erosão do solo, chegando a 8 ton/ha.ano (soja nos cerrados), 0,03 a 0,05 ton/ha.ano (canola na Suécia) e 7,7 a 14 ton/ha.ano (óleo de palma na Malásia). Outro ponto de destaque neste estudo, foi a avaliação da biodiversidade: para os casos do Brasil e Malásia existe risco maior de remoção de grande parte de espécies por hectare do que na Suécia. O autor aponta o pequeno número de áreas de preservação nos cerrados como possível causa da diminuição de biodiversidade; caso esse número fosse maior, as espécies seriam menos vulneráveis.

CARPENTIERI et al. (2005) realizaram uma ACV através de simulações de geração de energia através de ciclo combinado integrado com gaseificação de biomassa e compararam com o ciclo combinado integrado com gaseificação de carvão. Seus resultados mostraram uma competitividade entre a biomassa e o carvão. A eficiência do ciclo para a biomassa foi de 33,4%, com uma emissão de CO₂ em torno de 178 kg/MWh (e eficiência de remoção de CO₂ de 80%), já a eficiência do ciclo do carvão foi de 38,8%, com emissão de CO₂ de 130 kg/MWh.

RIVA et al. (2006) analisaram o ciclo de vida do GN para produção de energia elétrica, comparando com outras fontes de energia como óleo diesel e carvão. Concluíram que o gás natural reduz em 53 a 65% os GEE e em 81 a 93% o Potencial de Acidificação quando comparado com o carvão e cerca de 47 a 60% os GEE e em 79 a 92% o Potencial de Acidificação quando comparado com o óleo diesel. O percentual de redução depende do escopo considerado na análise e da fonte de dados considerada no inventário, pois um dos problemas ressaltado por este estudo em relação a uma ACV é a fonte de dados para elaboração do inventário. As vantagens do gás natural sobre o óleo diesel e carvão aumentam caso seja considerado todas as etapas da produção até o uso final.

Como abordado por UGAYA (2001), uma ACV completa necessita de muitos dados, principalmente quando se trata de produtos complexos. Então a delimitação do escopo é imprescindível para a conclusão do estudo. Esta situação pode proporcionar resultados limitados.

FIGURA 14 – FLUXOGRAMA DAS FASES DE UMA ACV



FONTE: Adaptado de KORONEOS et al. (2004)

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada para esta dissertação foi composta por: pesquisa bibliográfica, já apresentada no capítulo anterior; pesquisa de campo, que será detalhada nesta seção; desenvolvimento de um simulador matemático para quantificação das entradas e saídas de todas as etapas da fase de pós-colheita de grãos e realização de uma ACV. Abaixo será detalhada cada etapa deste trabalho.

3.1 PESQUISA DE CAMPO

Os objetivos das visitas de campo foram: o levantamento do perfil energético das agroindústrias, informações sobre uso de combustíveis na secagem, técnicas de aeração e conhecimento dos equipamentos em escala industrial. Esses dados serviram para alimentar o simulador matemático, bem como para conferir alguns resultados produzidos pelo mesmo.

As visitas foram realizadas nas agroindústrias (de grande porte) do Estado do Paraná (PR). Os dados já coletados anteriormente por ERRERA et al. (2002) de empresas de pequeno e grande porte e cooperativas foram atualizados.

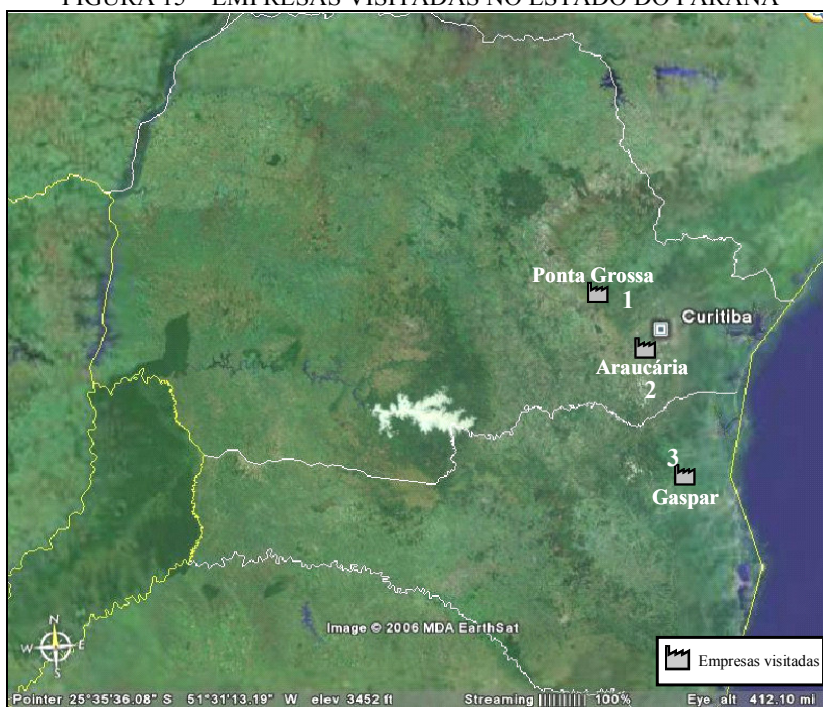
Os dados foram coletados através do preenchimento de uma planilha (Anexo 2) de dados elaborada pelo Grupo GEANEX. Esta planilha foi revisada e informações ambientais foram introduzidas (principalmente a respeito das áreas de reflorestamento). As questões da planilha foram divididas em: atividade principal, matéria-prima utilizada, umidade média de chegada e saída do produto, fonte e consumo de energia térmica para secagem dos grãos, existência de áreas de reflorestamento, demanda contratada e consumo de energia elétrica, capacidade instalada de secagem e armazenamento.

Como as empresas do setor agroindustrial são muito parecidas, os critérios utilizados para escolha das empresas foram: o porte, capacidade de secagem e armazenamento, inovação tecnológica, melhor uso dos combustíveis. Levando em

consideração esses aspectos citados, as empresas escolhidas no Paraná foram todas de grande porte, como a Imcopa (possui uma planta de cogeração com ciclo a vapor), a Cargill Agrícola (possui caldeira com utilização de resíduos de madeiras) e Bunge Alimentos (visitou-se a matriz brasileira em Gaspar-SC) (MARQUES et al., 2006a; MARQUES et al., 2006b).

A Figura 15 mostra a localização das empresas que foram visitadas no Paraná e a matriz brasileira da BUNGE Alimentos na cidade de Gaspar-SC, onde obteve-se dados de outras unidades da BUNGE no Paraná. Estes levantamentos aconteceram nos dois primeiros meses de 2006 (estas visitas serviram para confirmação de dados utilizados no simulador).

FIGURA 15 – EMPRESAS VISITADAS NO ESTADO DO PARANÁ



NOTA: Empresas visitadas em 2006.

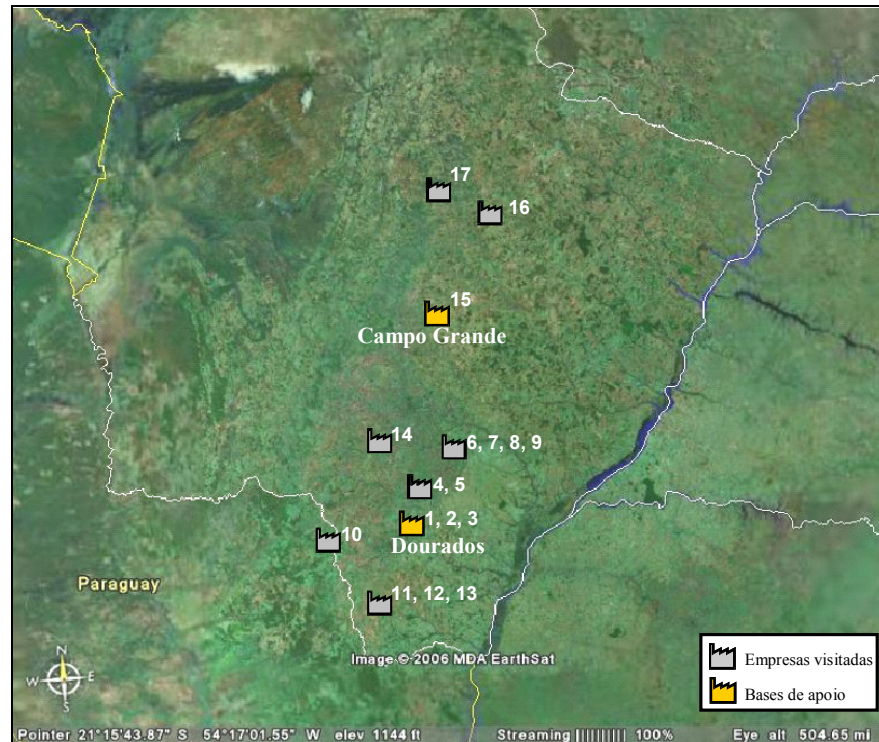
- 1- CARGILL AGRÍCOLA S/A e BUNGE Alimentos
- 2 - IMCOPA – Importação, exportação e Indústria de Óleos Ltda.
- 3- Matriz brasileira BUNGE Alimentos

FONTE: ADAPTADO DO SOFTWARE GOOGLE EARTH

Em função do estudo (levantamento do perfil das agroindústrias) realizado pelo Grupo de Estudos em Exergia, Emergia e Termoeconomia para Estratégias de Desenvolvimento Sustentável (GEANEX), no Estado do Mato Grosso do Sul (MS),

em julho de 2005, realizou-se algumas visitas também naquele Estado (Figura 16). Como os perfis das agroindústrias são semelhantes, os dados coletados nessas visitas também serviram para confirmação de resultados do simulador.

FIGURA 16 - EMPRESAS VISITADAS NO ESTADO DO MATO GROSSO DO SUL



NOTA: Visitas efetivamente realizadas nº. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 13, o restante das visitas foram realizadas pelo grupo GEANEX (ERRERA et al., 2005).

Lista das Empresas Visitadas

- | | |
|--|--|
| 1 – COOAGRI - Cooperativa Agropecuária e Industrial Ltda | 9 – Pantanal Comércio de Cereais Ltda |
| 2 – Bonanza Armazéns Gerais Ltda | 10 – Sperafico Agroindustrial Ltda |
| 3 – COPACENTRO - Cooperativa Agropecuária do Centro Oeste | 11 – Sperafico Agroindustrial Ltda (Fazenda) |
| 4 – Cerealista Balasso | 12 – COAMO Agroindustrial Cooperativa |
| 5 – Jangada Armazéns Gerais Ltda | 13 – Cooperativa Agroindustrial LAR |
| 6 – São Lourenço Armazéns Gerais | 14 – ADM do Brasil Ltda |
| 7 – Cerealista Agro Rio Ltda | 15 – Bunge Alimentos |
| 8 – C-VALE - Cooperativa Agrícola Mista Vale do Piquiri LTDA | 16 – Cargill Agrícola S/A |
| | 17 – COASGO - Cooperativa Agropecuária São Gabriel do Oeste Ltda |

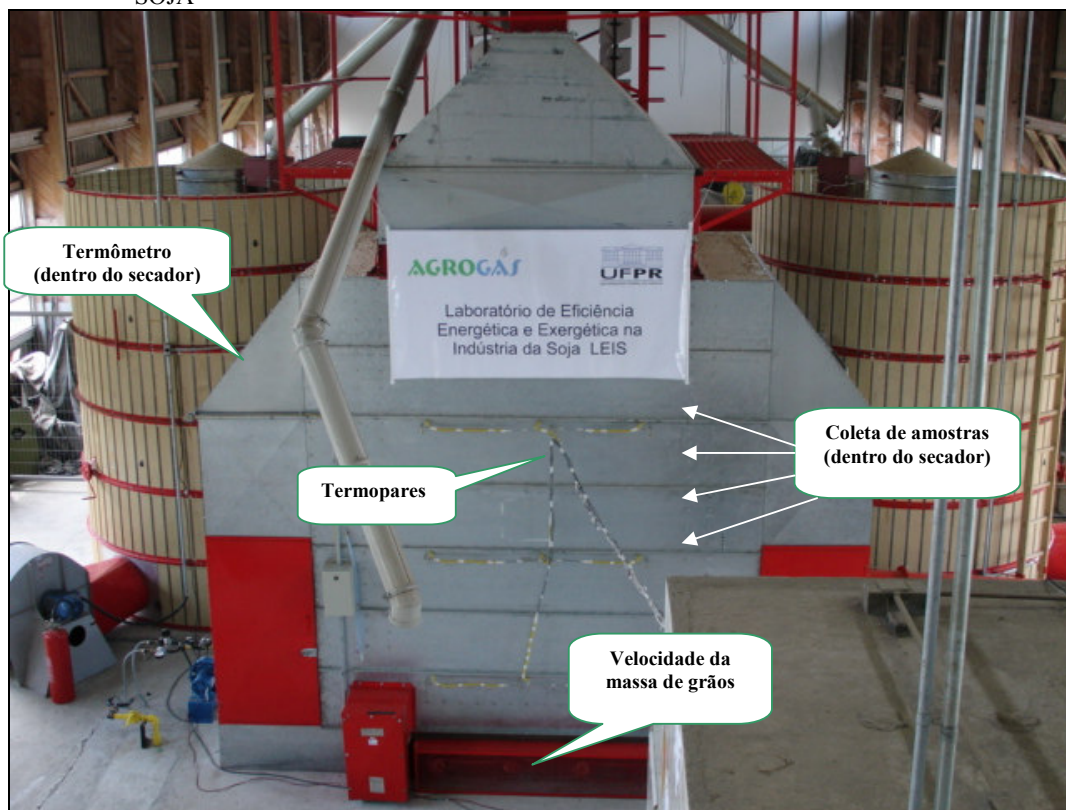
FONTE: ADAPTADO DO SOFTWARE GOOGLE EARTH

3.2 CORRIDA EXPERIMENTAL

Realizou-se uma corrida experimental para secagem de soja no Laboratório de Eficiência Energética e Exergética na Indústria da Soja (LEIS), mostrado na Figura 17. Esta corrida serviu para visualizar o funcionamento de uma planta típica de secagem, porém em escala semi-industrial, e para conferir alguns dados típicos de consumo de gás, umidade, temperatura de secagem e da massa de grãos.

A soja utilizada na corrida foi oriunda do campo com umidade média de 19% b.u. e foi seca até umidade de 13% b.u. (LOPES et al, 2005).

FIGURA 17 – LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E EXERGÉTICA NA INDÚSTRIA DA SOJA



3.3 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

Nesta seção apresentam-se os parâmetros adotados para realização da ACV. Como o foco principal deste trabalho foi a avaliação dos potenciais de impactos

ambientais decorrentes das emissões atmosféricas na fase de pós-colheita de grãos, e não especificamente a realização de uma ampla ACV, o escopo desta análise foi delimitado.

3.3.1 Definição do Objetivo e Escopo

A ACV realizada neste trabalho teve como objetivo avaliar quantitativamente os potenciais de impactos ambientais decorrentes das emissões atmosféricas na fase de pós-colheita de grãos.

3.3.2 Identificação do Sistema e dos Subsistemas

Os processos que constituem a fase de pós-colheita de grãos se iniciam com o transporte do campo até as unidades de pré-processamento, onde seguem para a pré-limpeza, secagem, limpeza e armazenamento. Etapas que foram consideradas nesta ACV (Figura 18).

3.3.3 Identificação do Produto, Processo ou Atividade

Nas etapas citadas no item anterior são utilizados vários equipamentos, como caminhões, máquinas de pré-limpeza e limpeza, secadores, correias transportadoras, elevadores de canecas, unidades armazenadoras (silos e armazéns). Estes necessitam de insumos como aço, concreto e borracha, entre outros, (mostrados na Figura 19) para suas manufaturas. O insumo mais utilizado na pós-colheita são os combustíveis para geração de energia térmica para secagem dos grãos. Assim, esta ACV teve como maior enfoque, o ciclo de vida dos combustíveis utilizados na pós-colheita de grãos (GN, GLP, lenha, biodiesel e OD), mas também, avaliou a fabricação de alguns insumos, como: fabricação do aço, concreto e geração de eletricidade.

FIGURA 18 – ETAPAS DA PÓS-COLHEITA DE GRÃOS CONSIDERADAS NA ACV

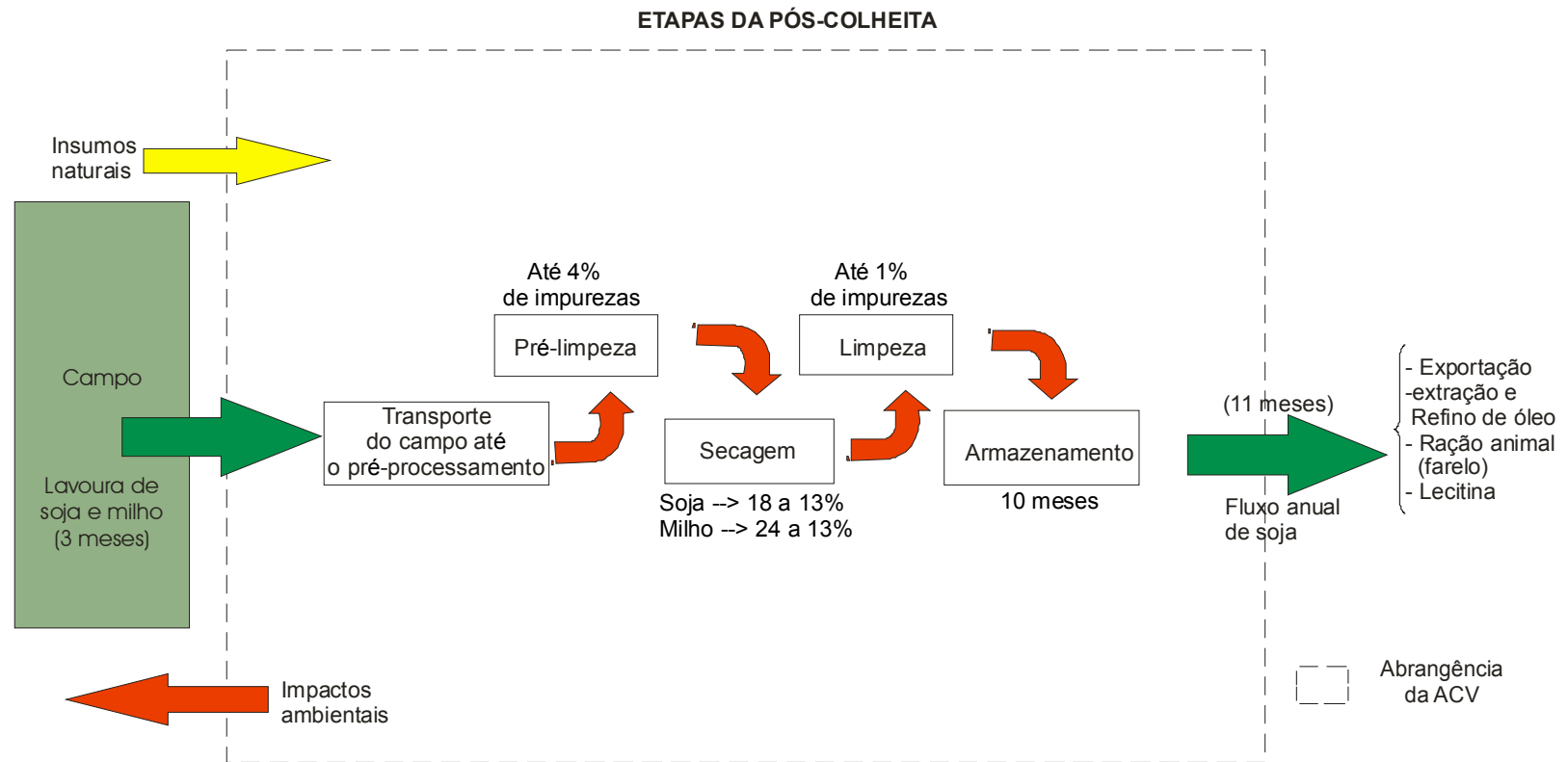
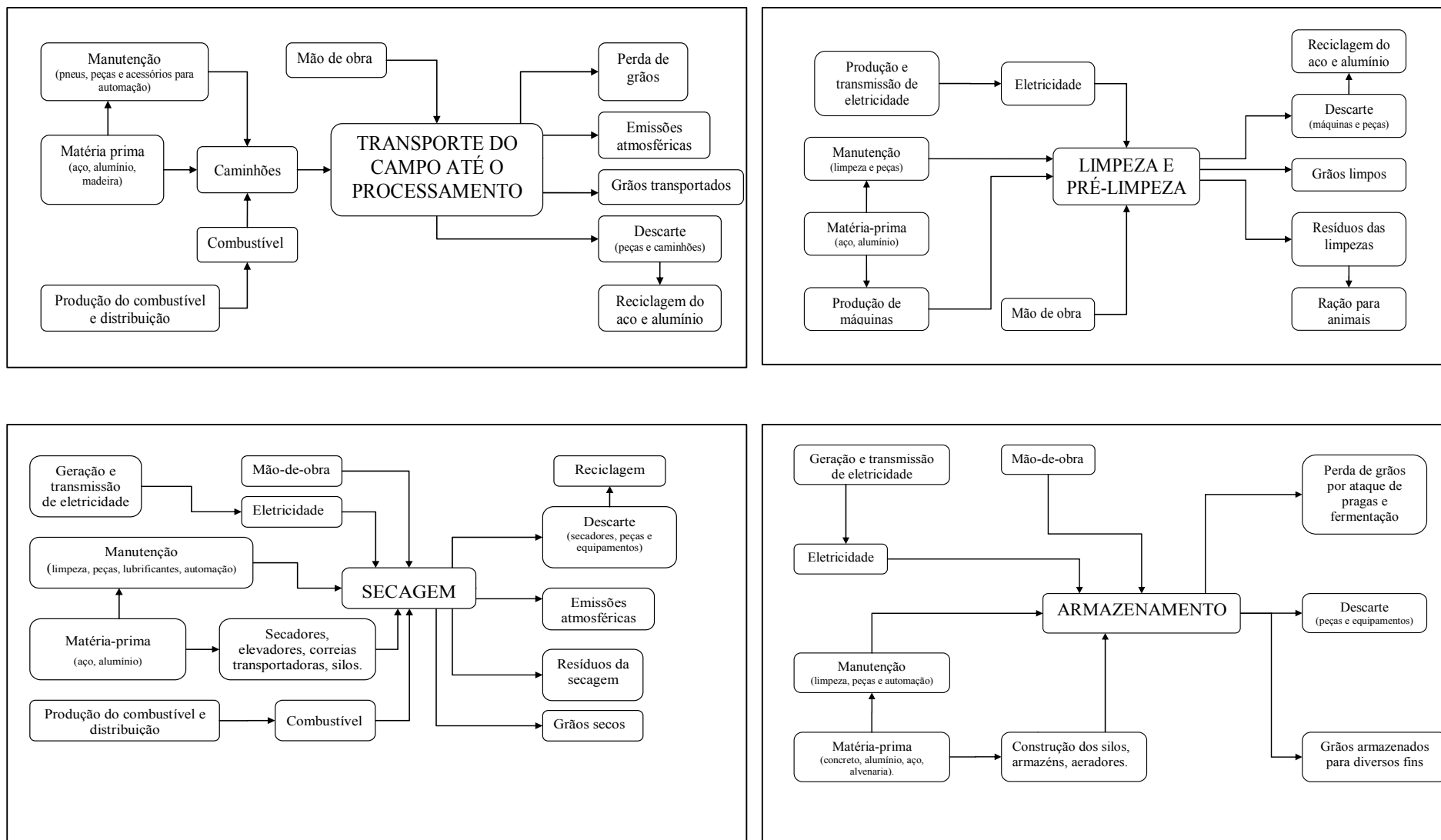


FIGURA 19 - FLUXOGRAMAS DETALHADOS DAS ETAPAS CONSIDERADAS NA ACV



3.3.4 Definição da Fronteira e do Período

A análise se limita ao Estado do Paraná e o período da análise foi de 21 anos, tempo igual a três ciclos de crescimento de áreas de reflorestamento. Entende-se que com este período é possível uma melhor avaliação da sustentabilidade energo-ambiental do setor agroindustrial. Uma análise com um período maior (média de 30 anos) é suscetível a interferências e mudanças no atual cenário agroindustrial.

Utilizou-se a referência de ciclos de crescimento de áreas de reflorestamento, pelo fato da lenha ser o combustível mais utilizado na agroindústria.

3.3.5 Definição dos Impactos Ambientais

Após analisarem-se as etapas abordadas neste estudo, levando em consideração a produção dos insumos necessários em cada processo (Figura 19), os impactos ambientais mais importantes estão descritos na Tabela 4. Em função do objetivo desta análise, consideraram-se apenas os impactos causados pelas emissões atmosféricas.

TABELA 4 – IMPACTOS AMBIENTAIS ASSOCIADOS NA FASE DE PÓS-COLHEITA DE GRÃOS

PÓS-COLHEITA	IMPACTOS AMBIENTAIS
EMISSIONES ATMOSFÉRICAS	
CO₂, CH₄, N₂O	Aquecimento Global (Efeito estufa)
NO_x, SO_x	Precipitações Ácidas
RESÍDUOS SÓLIDOS	Contaminação do solo
EFLUENTES LÍQUIDOS	Poluição e contaminação das Águas

3.3.6 Descarte

Quando da ocasião do descarte dos equipamentos e peças de manutenção, a quantidade maior de material a ser descartado será o aço utilizado nos secadores, silos e armazéns, que pode ser reciclado. Devido à vida útil dos equipamentos serem no mínimo de 30 anos, superior ao período desta análise, o descarte do aço não teve

relevância neste estudo.

Os pneus, baterias, resíduos de lubrificantes, outras peças utilizadas pelos caminhões, entre outros equipamentos e acessórios não foram considerados neste estudo.

3.3.7 Definição da Unidade Funcional

A unidade funcional escolhida para o estudo foi o pré-processamento (desde a colheita até o armazenamento) de 1 tonelada de grão (soja ou milho) dentro dos padrões de qualidade.

O pré-processamento de 1 tonelada de grão (soja ou milho) consiste em: 1 tonelada de soja colhida no campo com umidade de 18% b.u., transportada até as unidades de processamento, retirada as maiores impurezas na pré-limpeza (até 4,0% de impurezas e avariados), seca até a umidade de 13% b.u., retirada as menores impurezas (até 1,0% de impurezas e avariados) e, caso seja necessário, armazenada por 10 meses dentro dos padrões de aeração e controle de temperatura (EMBRAPA, 2004).

3.3.8 Análise do Inventário

Os dados utilizados nesta Análise de Inventário (AI) foram coletados através de artigos científicos e livros técnicos, pesquisas de campo²², relatórios técnicos do Projeto Agrogás II, catálogos de fabricantes de equipamentos de pós-colheita de grãos e instituições nacionais de pesquisa.

A Tabela 5 apresenta os resultados dos cálculos das principais entradas e saídas de cada etapa de pós-colheita de grãos de acordo com a unidade funcional definida em 3.3.7. A Tabela 6 é específica para os combustíveis estudados nesta análise.

²² Vide planilha utilizada nas visitas de campo (Anexo 2)

Os valores apresentados nas Tabelas 5 e 6 foram calculados através do simulador matemático (Apêndice 1) desenvolvido neste trabalho.

TABELA 5- PRINCIPAIS ENTRADAS E SAÍDAS DE CADA ETAPA DA PÓS-COLHEITA EM UNIDADE FUNCIONAL

ETAPAS	ENTRADAS	UN		SAÍDAS ⁽¹⁾		QUANTIDADE	
Transporte	Caminhões	Un	1	Descarte (manutenção)	kg	nc	nc
	Óleo diesel	lt	0,5	Emissões atmosféricas	g	1358 CO ₂ ^{eq}	1,4 SO ₂ ^{eq}
Pré-limpeza	Máquinas	Un	1	Descarte (manutenção)	kg	nc	nc
	Eletricidade	kWh	0,08	Resíduos da pré-limpeza	kg	nd	nd
				Emissões atmosféricas	g	38,35 CO ₂ ^{eq}	0,0093 SO ₂ ^{eq}
Secagem				Resíduos da secagem	kg	nd	nd
	Secadores	Un	1	Descarte (manutenção)	kg	nc	nc
	Combustível	<i>Tab. 6</i>	<i>Tab. 6</i>	Emissões atmosféricas	<i>Tab. 6</i>	<i>Tab. 6</i>	<i>Tab. 6</i>
	Eletricidade	kWh	0,44	Emissões atmosféricas	g	2,06 CO₂^{eq}	0,0005 SO₂^{eq}
Limpeza				Descarte (manutenção)	kg	nc	nc
	Máquinas	Un	1	Resíduos da limpeza	kg	nd	nd
	Eletricidade	kWh	0,013	Emissões atmosféricas	g	6,13 CO ₂ ^{eq}	0,0014 SO ₂ ^{eq}
Armazenagem	Silos	Un	1	Descarte (manutenção)	kg	nc	nc
	Armazéns	Un	1	Descarte (manutenção)	kg	nc	nc
	Eletricidade	kWh	0,362	Emissões atmosféricas	g	691,46 CO ₂ ^{eq}	0,167 SO ₂ ^{eq}

NOTA: Para o transporte considerou-se um desempenho por caminhão de 4 km/litro de óleo diesel e uma distância média de 60 km das lavouras de grãos até as unidades de pré-processamento

nc – não considerado em função da vida útil de 30 anos.

nd – não disponível

(1) O descarte do aço não foi considerado em função da vida útil dos equipamentos (item 3.4.6)

TABELA 6 - ENTRADAS E SAÍDAS DOS COMBUSTÍVEIS EM UNIDADE FUNCIONAL

COMBUSTÍVEIS	ENTRADAS	UN	SAÍDAS		UN
			CO ₂ ^{eq}	SO ₂ ^{eq}	
GN	5,5860	Nm ³	15,45	0,0500	kg
Lenha ⁽¹⁾	0,0181	ton	10,96	0,0571	kg
GLP	1,9937	Nm ³	19,59	0,0616	kg
Óleo Diesel	0,0067	m ³	20,29	0,0664	kg
Biodiesel	0,0084	m ³	5,840	0,0568	kg

(1) Eucalipto – Emissões líquidas de CO₂^{eq}.

A Tabela 7 mostra os fatores de emissões associados ao ciclo de vida dos combustíveis utilizados na pós-colheita de grãos. A coluna da direita mostra todas as referências utilizadas para cada combustível. Os dados internacionais foram considerados em função da ausência de dados na literatura brasileira. Entretanto, esses dados não influenciaram significativamente no resultado final do trabalho.

TABELA 7 – FATORES DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS NO CICLO DE VIDA DE CADA COMBUSTÍVEL

PRODUÇÃO DO COMBUSTÍVEL							Referências		
GN	0,03 kg CO ₂ ^{eq} /m ³		0,727 × 10 ⁻⁴ kg SO ₂ ^{eq} /m ³				10		
Óleo Diesel*	120,0 kg CO ₂ ^{eq} /m ³		6,490 × 10 ⁻¹ kg SO ₂ ^{eq} /m ³				11		
Lenha	1,230 kg CO ₂ ^{eq} /kg		-				12		
GLP	0,31 kg CO ₂ ^{eq} /m ³		0,544 × 10 ⁻³ kg SO ₂ ^{eq} /m ³				13		
Biodiesel	1,400 kg CO ₂ ^{eq} /kg		3,297 × 10 ⁻² kg SO ₂ ^{eq} /kg				14		
TRANSPORTE DO COMBUSTÍVEL (CO ₂ ^{eq} e SO ₂ ^{eq})									
Biodiesel									
Para o transporte destes combustíveis foram utilizados caminhões tanques e carretas, abastecidos com óleo diesel, então o fator de emissão para CO ₂ ^{eq} e SO ₂ ^{eq} considerado foi o mesmo do uso final do diesel.									
Óleo Diesel									
Lenha									
GLP**									
GN	0,164 kg CO ₂ ^{eq} /m ³		0,570 × 10 ⁻⁵ kg SO ₂ ^{eq} /m ³				10		
USO FINAL DO COMBUSTÍVEL NA SECAGEM (kg/GJ)									
COMBUSTÍVEIS	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂ ^{eq}	NO _x	SO _x	SO ₂ ^{eq}	MP	Referências
Biodiesel	50,53	0,01200	0,00400	54,33	0,074	nd	0,052	0,05140	9
GN	57,87	0,00092	0,00010	56,39	0,040	0,00024	0,028	0,00320	1;2;3
GLP**	65,00	0,00094	0,00094	65,31	0,093	Traços	0,066	0,00284	3;4
Óleo Diesel*	73,50	0,01100	0,00400	76,99	0,068	0,03400	0,082	0,09700	3;4;6;7
Lenha	83,72	0,00013	0,01800	84,14	0,058	0,00200	0,043	0,26000	1;3;5;7;8

NOTA: O fator de emissão de CO₂ para o GN, utilizando queimadores foi calculado pelo programa desenvolvido no IT, pois na literatura foi encontrado apenas o fator de emissão para caldeiras a GN.

nd – não disponível

* Diesel metropolitano

** 60% propano e 40% butano

FONTE: (1) WORLD BANK,²³ apud LORA (2002)

(2) EPA (2001)

(3) EPA (1995)

(4) IPCC (2005)

(5) NOGUEIRA E LORA (2003)

(6) HINRICHS E KLEINBACH (2003)

(7) EC (2004)

(8) EIA (2003)

(9) ARAUJO (2000)

(10) RIVA ET AL. (2006)

(11) FURUHOLT (1995)

(12) DUBUISSON E SINTZOFF (1998)

(13) LEWIS (1997)

(14) WORLD ENERGY (2006)

Para o cálculo da quantidade de CO₂^{eq} utilizou-se o fator GWP (*Global Warming Potential*), que considera 1 grama de CH₄ e 1 grama de N₂O o equivalente a 21 e 310 gramas de CO₂, respectivamente. Para o SO₂^{eq} utilizou-se o fator AP (*Acidification Potential*), que considera 1 grama de NO_x o equivalente a 0,7 grama de

²³ WORLD BANK **Greenhouse Gas Abatement and Climate change**. Pollution Prevention and Abatement Handbook. 1998. Disponível em: <<http://Inweb18.worldbank.org/essd/envext.nsf/51ByDocName/GreenhouseGasAbatementandClimateChange>> Acesso em: 20 out. 2005.

SO_x. (IPCC, 1997).

Para quantificação das emissões da lenha e do biodiesel, realizou-se o balanço de carbono (Carbono capturado no ciclo de crescimento menos o emitido pela combustão).

No cálculo do balanço de carbono da lenha, alguns parâmetros foram adotados conforme mostrados na Tabela 8.

TABELA 8– DADOS CONSIDERADOS NO BALANÇO DE CARBONO DA LENHA

PARÂMETROS	VALORES	UNIDADES	REFERÊNCIAS
Produtividade	15,71	ton/ha.ano	1
PCI	0,019912	GJ/kg	2
Seqüestro de Carbono*	71,3	ton C/ha	3
Fator de emissão (uso final em kg/GJ)			
CO ₂ = 83,72			4
CH ₄ = 0,018			5
CO = 0,258			6

* considerando a fixação apenas pelo tronco e casca (partes que geralmente são queimadas nas fomalhas)

FONTE: (1) MARCOLIN (2002)
 (2) GARCIA (2002)
 (3) SANQUETTA et al. (2004)
 (4) NOGUEIRA E LORA (2003)
 (5) EPA (2001)
 (6) EPA (1995)

O resultado do balanço realizado apresentou uma quantidade média de carbono seqüestrado 20% superior ao carbono emitido pela combustão.

A falta de informações complementares sobre os dados pesquisados, divergências entre valores encontrados na literatura, principalmente no que diz respeito a variação de parâmetros em função da umidade (produtividade, densidade, PCI, seqüestro de carbono), foram pontos significativos nesta diferença de 20% no balanço de carbono. Além disso, não se quantificou a quantidade de carbono presente nas cinzas e fuligens.

Levando em consideração os fatos acima, se quantificou as emissões do balanço de CO₂^{eq}(somando as emissões líquidas da produção, transporte e uso final). Para isto utilizou-se a relação de 3,66 kg de CO₂ para cada kg de Carbono. Assim, o resultado para o balanço foi de 0,53 ton de CO₂^{eq}/ton de soja (Tabela 9).

TABELA 9 – BALANÇO DE CO₂^{eq} PARA LENHA

ETAPAS	ton de CO ₂ ^{eq} /ton de lenha	REFERÊNCIAS
SEQÜESTRO	2,38	1
PRODUÇÃO	1,23	2
TRANSPORTE	1×10^{-3}	3
USO FINAL	1,68	3
BALANÇO	0,53	-

FONTE: (1) SANQUETTA (2004)
 (2) DUBUISSON E SINTZOFF (1998)
 (3) Vide Tabela 7

Para o cálculo das emissões no ciclo de vida do biodiesel de soja adotou-se o mesmo critério da lenha. O balanço de carbono do também ficou em torno dos 20% a mais para o seqüestro em comparação ao uso final do biodiesel. Os motivos deste resultado foram os mesmos relatados para o caso da lenha, além da dificuldade na determinação do percentual de carbono existente no biodiesel.

Desse modo, também se realizou o balanço de CO₂^{eq} considerando as emissões líquidas da produção de soja, extração do óleo de soja, conversão deste em biodiesel, transporte e no uso final (Tabela 10).

As emissões líquidas por massa de biodiesel foram maiores que as da lenha, devido as grandes áreas plantadas de soja necessárias para produção do biodiesel. Pois, pesquisas (e.g. WORLD ENERGY, 2006) mostram que um quilograma de soja plantada gera apenas 0,18 kg de óleo de soja, o qual será convertido em biodiesel. Então, para se produzir certa quantidade de biodiesel de soja, é necessário mais do que cinco vezes a quantidade de grãos de soja, conseqüentemente, aumentando as áreas plantadas e as emissões na produção de soja (considerada apenas para cálculo do balanço de CO₂^{eq} do biodiesel).

TABELA 10 - BALANÇO DE CO₂^{eq} PARA O BIODIESEL

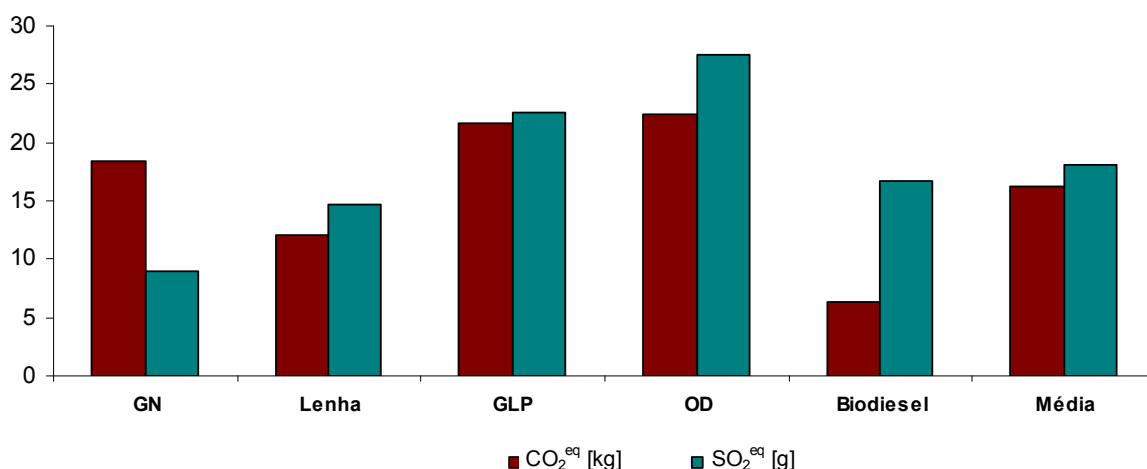
ETAPAS	kg de CO ₂ ^{eq} /kg de biodiesel	REFERÊNCIAS
Produção		
Agricultura	-1,77000	1
Extração do óleo	0,20878	1
Conversão em biodiesel	0,18095	1
Transporte	$1,22 \times 10^{-3}$	2
Uso Final	2,020	2
Balanço	0,637	-

FONTE: (1) WORLD ENERGY (2006)
 (2) Vide Tabela 7

Todavia quando se utiliza lenha e biodiesel para secar uma tonelada de soja as emissões específicas do biodiesel são menores, em função de seu poder calorífico ser maior que o da lenha, consequentemente necessitando de menos quantidade de biodiesel do que lenha. Além disto, a eficiência da fornalha a biodiesel é maior que a fornalha a lenha.

A Figura 20 ilustra os resultados calculados das emissões atmosféricas por unidade funcional do ciclo de vida dos combustíveis.

FIGURA 20 - EMISSÕES ATMOSFÉRICAS LÍQUIDAS EM UNIDADE FUNCIONAL



Observam-se as baixas emissões atmosféricas para lenha e biodiesel. Isto só ocorre se a lenha for oriunda de áreas de reflorestamento ou planos de manejos adequadamente preparados, pois caso a lenha venha de áreas de floresta nativa o seqüestro não deve ser quantificado, levando as emissões para um nível mais elevado. O mesmo vale para o biodiesel, este precisa ser oriundo de plantações de soja em áreas adequadas para o cultivo.

Ainda em relação à Figura 20, as emissões de gas acidificantes para lenha e biodiesel foram maiores do que o GN. Isto se deve à quantidade de NO_x emitida por todas as fases do ciclo de vida da lenha e biodiesel.

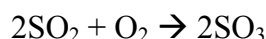
3.3.9 Avaliação dos Impactos

Na fase de pós-colheita de grãos, como demonstrado na seção 3.3.11, o impacto mais significativo refere-se as emissões atmosféricas originadas principalmente na queima de fontes primárias de energia para aquecimento do ar de secagem.

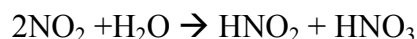
Essas emissões de gases poluentes contribuem para o aumento de um dos principais problemas ambientais de caráter mundial, que é o aquecimento global através do efeito estufa.

De acordo com a literatura (e.g., UNFCCC, 2005) o efeito estufa é causado por gases (CO_2 , CH_4 , N_2O , CFCs) presentes na atmosfera que impedem a passagem de radiação infravermelha emitida pelo planeta.

Além disso, os gases acidificantes (SO_x) também presentes nas emissões atmosféricas da queima de combustíveis na pós-colheita de grãos podem provocar precipitações ácidas, através da oxidação do SO_2 em SO_3 e da reação deste último com vapor d'água (conforme reação abaixo), formando ácido sulfúrico, acarretando danos ao meio ambiente (acidificação de lagos, danos a vegetação e florestas, corrosão de construções) e a saúde humana (doenças respiratórias, irritação nos olhos, entre outras) (e.g. HINRICHS E KLEINBACH, 2003).



O ácido nitroso e nítrico, também são formados pela reação do NO_2 com vapor d'água, conforme reação abaixo:



3.3.10 Avaliação das Melhorias

Os impactos ambientais decorrentes da fase de pós-colheita de grãos, discutidos neste trabalho, podem ser mitigados através de medidas que visem a

sustentabilidade energo-ambiental, ou seja, uso de novas tecnologias para conversão de fontes primárias de energia e de energias alternativas.

O uso de energia renovável, como solar, eólica, biocombustíveis, biogás, entre outras menos poluentes, e o uso de novas tecnologias de combustão podem ser soluções para diminuição dos impactos ambientais, principalmente das emissões atmosféricas. Todavia, com a atual concepção do uso de combustíveis através da combustão direta, a redução dos impactos ambientais fica limitada a eficiência dos equipamentos, medidas de controle de perdas de calor por dissipação, novas tecnologias de conversão de energia, entre outros.

Diante disto, os princípios de uso racional de energia (exergia) ganham importância no sentido de diminuir os impactos ambientais. A alternativa principal é a cogeração para suprimento da demanda térmica e elétrica na fase de pós-colheita de grãos.

As alternativas de cogeração serão mostradas no estudo de caso do Estado do Paraná (capítulo 4).

3.3.11 Análise da Relevância de Parâmetros Secundários

Neste tópico avaliou-se a significância de alguns parâmetros não abordados na ACV, como, por exemplo, fabricação do aço e concreto (construção dos silos, secadores e armazéns), borracha (manufatura das correias transportadoras), peças e componentes automotivos (montagens dos caminhões), geração de energia elétrica (movimentação dos equipamentos).

Dentre estes insumos, foram avaliadas as relevâncias da: fabricação do aço, fabricação do concreto e geração de energia elétrica.

A Tabela 11 apresenta estimativas da quantidade aço para construção de uma unidade de cada equipamento e a energia elétrica necessária em cada etapa estudada.

Os comprimentos adotados para os silos, armazéns e secadores estão foram aproximadamente: $50 \times 100 \times 10\text{m}$ (armazém), $18 \times 23\text{m}$ (silos) e $27 \times 8 \times 6\text{m}$

(secador).

TABELA 11 – ESTIMATIVAS DE QUANTIDADE DE AÇO E ENERGIA ELÉTRICA

AÇO (EQUIPAMENTOS)		ENERGIA ELÉTRICA (ETAPAS)	
Secador	12,6 ton	Pré-limpeza	0,082 kWh
Silo	21,7 ton	Secagem	0,441 kWh
Armazém	227,2 ton	Limpeza	0,013 kWh
		Aeração	0,036 kWh

Os fatores de emissões de CO_2^{eq} e SO_2^{eq} usados para estes cálculos estão na Tabela 12.

TABELA 12 – FATORES DE EMISSÕES NA FABRICAÇÃO DO AÇO

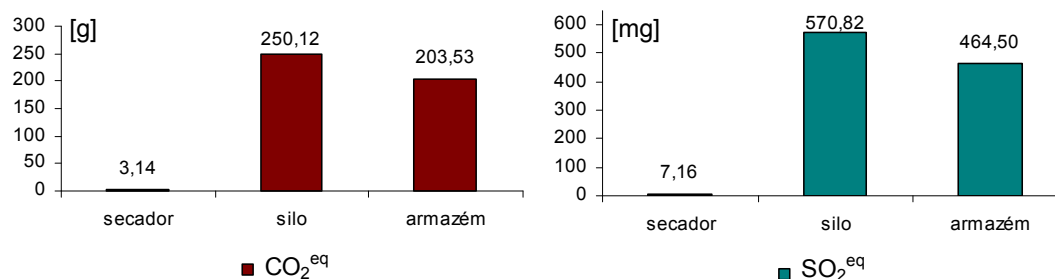
GASES EFEITO ESTUFA (ton/tap)		GASES ACIDIFICANTES (ton/tap)	
CO_2	1,6	NO_2+NO_3	0,00510
CH_4	0,000005	SO_2+SO_3	0,00011
N_2O	0,00004	SO_2^{eq}	0,00368
CO_2^{eq}	1,6125		

tap: tonelada de aço primário

FONTE: IPCC (2005)

A Figura 21 mostra os resultados da fabricação do aço. Como este insumo é usado apenas uma única vez em cada equipamento (silo, secador e armazém) ao longo da análise, por causa da vida útil desses equipamentos serem de 30 anos em média (ultrapassando o período da análise), a contribuição para as emissões atmosféricas foram insignificantes.

FIGURA 21 – EMISSÕES DE CO_2^{eq} E SO_2^{eq} NA FABRICAÇÃO DE AÇO EM UNIDADE FUNCIONAL



Observando-se a Tabela 11 e Figura 21, conclui-se que apesar da quantidade de aço para fabricação de um armazém ser maior que para fabricação de um silo, quando as emissões atmosféricas são expressas em unidade funcional a contribuição

dos armazéns é menor que a dos silos. Isto ocorre devido os armazéns terem uma capacidade maior de armazenagem.

Ainda em relação à Figura 21, as emissões de CO_2^{eq} chegaram a 0,02% para o secador, 1,77% para o silo e 1,44% para o armazém, comparados com a média das emissões do ciclo de vida dos combustíveis (Figura 20). Já as emissões de SO_2^{eq} foram de 0,01% para o secador, 1% para o silo e 0,75% para o armazém, também em relação à mesma média da Figura 20.

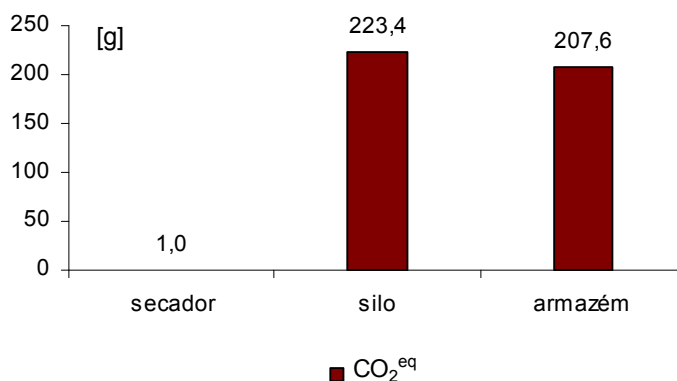
Ainda sobre os equipamentos, as emissões para fabricação do concreto para as fundações dos mesmos foram também avaliadas. A Tabela 13 mostra o volume de concreto estimado para as fundações de cada equipamento.

TABELA 13 – VOLUME ESTIMADO DE CONCRETO PARA AS FUNDAÇÕES DOS EQUIPAMENTOS

EQUIPAMENTO	VOLUME DE CONCRETO (m^3)
Secador	25
Silo	125
Armazém	1500

Considerou-se 312,5 kg de cimento por m^3 de concreto para fundações e fator de emissão de aproximadamente 0,8 ton de CO_2 /ton de cimento (SOARES, 1998). Foram desconsideradas as emissões da exploração dos outros insumos do concreto (brita, seixo, areia, etc.). O resultado desta análise está mostrado na Figura 22.

FIGURA 22– EMISSÕES DE CO_2 NA FABRICAÇÃO DO CONCRETO PARA AS FUNDAÇÕES EM UNIDADE FUNCIONAL



Nota-se na Figura 22 que as contribuições das emissões atmosféricas na fabricação do concreto são da ordem de 0,01% para o secador, 1,58% para o silo e 1,47 % para o armazém, comparando com a média de emissões da Figura 20.

Outro ponto analisado foi a geração de energia elétrica para movimentação dos equipamentos para toda a fase de pós-colheita. A Figura 23 ilustra a pequena contribuição das emissões atmosféricas (considerou-se geração hidroelétrica).

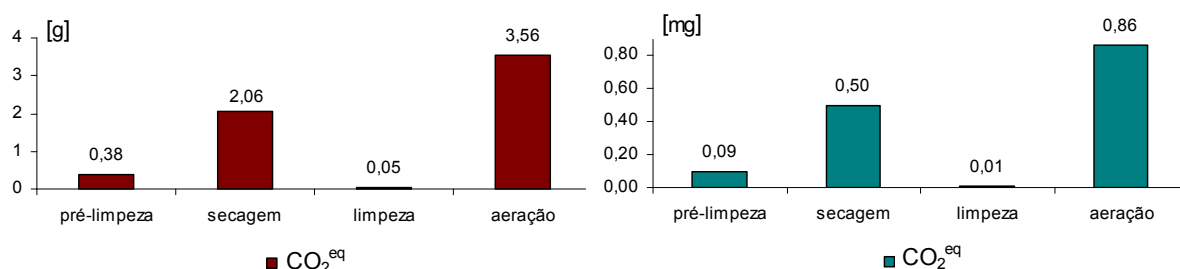
Os fatores de emissões utilizados estão descritos na Tabela 14 e, considerou-se a geração oriunda da hidrelétrica de Itaipu.

TABELA 14 – FATORES DE EMISSÕES NA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE			
GASES EFEITO ESTUFA (ton/MWh)		GASES ACIDIFICANTES (ton/MWh)	
CO ₂	0,001900000	NO _x	0,000001410
CH ₄	0,000132000	SO _x	0,000000146
N ₂ O	-	SO ₂ ^{eq}	0,000001133
CO ₂ ^{eq}	0,004672000		

NOTA: Não se considerou as emissões de CH₄, originadas pela decomposição da matéria orgânica dos reservatórios.

FONTE: MIRANDA (2003)

FIGURA 23– EMISSÕES DE CO₂^{eq} E SO₂^{eq} NA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE EM UNIDADE FUNCIONAL



Pode-se concluir ao se analisar a Figura 23 que as contribuições de CO₂^{eq} na geração de energia elétrica, expressas em unidade funcional, foram realmente insignificantes, chegando a 0,042% (energia para todas as etapas) comparando com a média da Figura 20. Para SO₂^{eq} o percentual ainda foi mais baixo, atingindo 0,000008%, comparando com a mesma média supracitada.

Diante dos resultados mostrados pelas Figuras 21, 22 e 23, comprova-se que os parâmetros que não foram considerados na ACV realmente não possuem grande influência no resultado final da análise.

3.4 SIMULADOR MATEMÁTICO

Com base nos dados pesquisados na literatura e coletados em campo, desenvolveu-se um simulador matemático no aplicativo Excel para compilação dos dados coletados, cálculos da Análise de Inventário (AI) e para prospecção de cenários no estudo de caso do Estado do Paraná, detalhado neste capítulo.

A Figura 24 indica a direção do fluxo de dados das etapas estudadas no simulador, e o Apêndice 1 apresenta as equações utilizadas.

Para o desenvolvimento do simulador, algumas considerações foram feitas e parâmetros foram adotados. A Tabela 15 mostra alguns parâmetros adotados para o transporte dos grãos e dos combustíveis até as unidades de processamento.

TABELA 15– PARÂMETROS ADOTADOS PARA TRANSPORTE DOS GRÃOS E COMBUSTÍVEIS

PRODUTO TRANSPORTADO	FORMA DE TRANSPORTE	DISTÂNCIA (km)	CAPACIDADE	REFERÊNCIAS
GRÃOS	Carreta Graneleira	60	30 ton	1
GN	Gasoduto	60	-	-
LENHA	Caminhão Rodotrem	100	69 ton	2
GLP	Caminhão Tanque	60	40 m ³	3
ÓLEO DIESEL	Caminhão Tanque	60	40 m ³	3
BIODIESEL	Caminhão Tanque	60	40 m ³	3

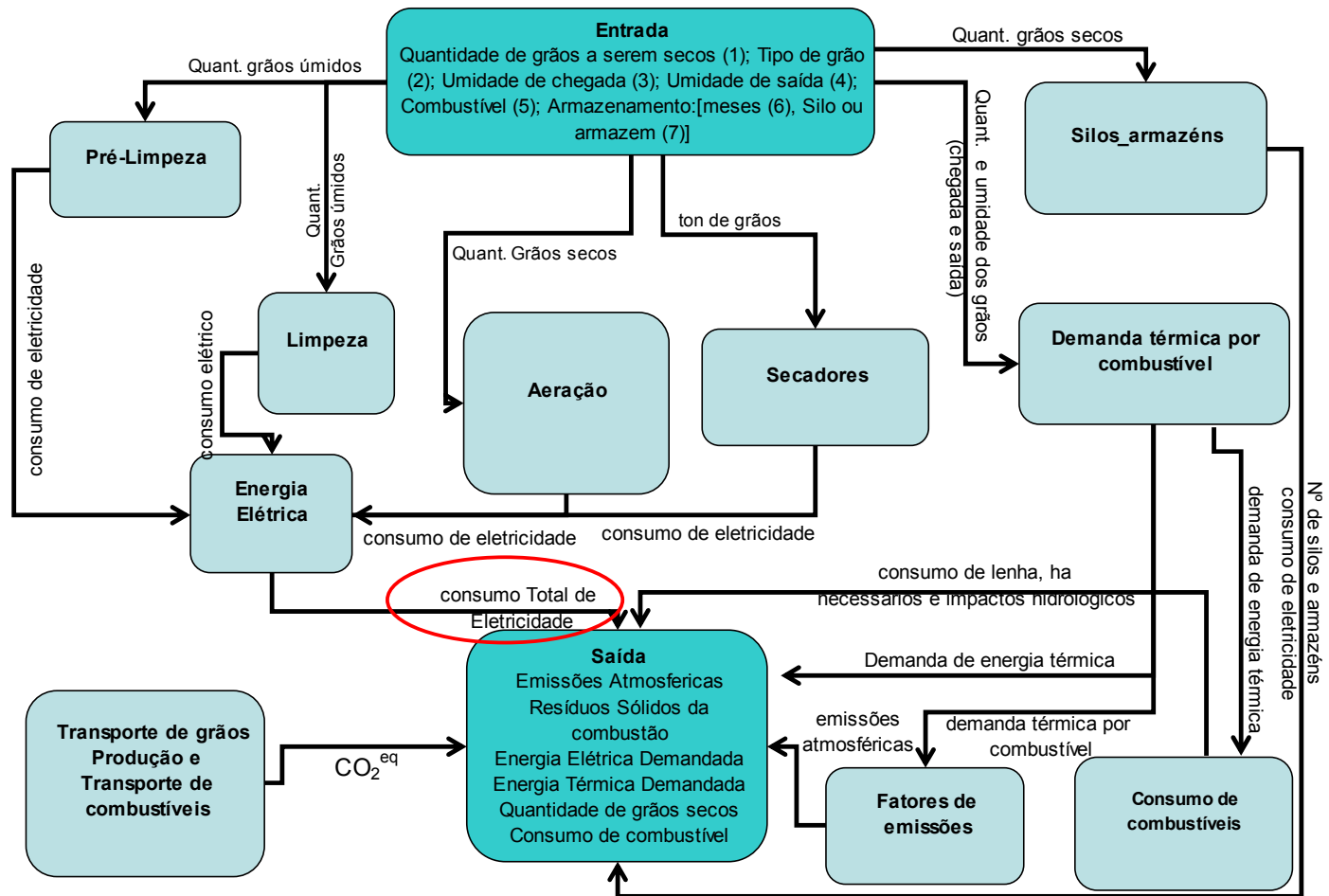
FONTE: (1) RODOSYSTEM (2005)

(2) SILVICULTURA (1994)

(3) TRELSA (2005)

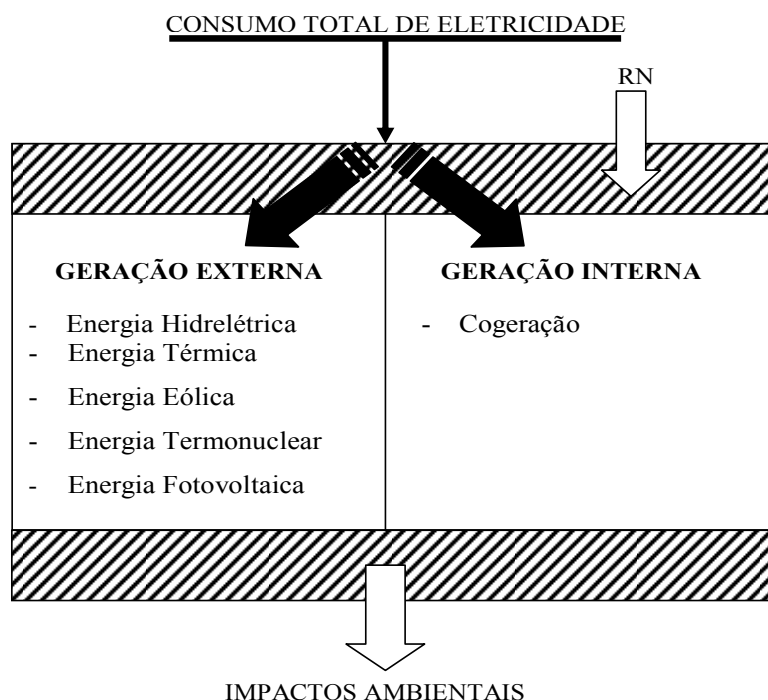
No transporte de GN, além das emissões atmosféricas que igualmente ocorrem no transporte dos outros combustíveis, existem os impactos ambientais da construção e operação dos gasodutos. Estes impactos são minimizados quando os gasodutos são implantados ao longo de rodovias, e possuem um agravante quando construídos em áreas de florestas, pois, é necessário o desmatamento de longas áreas para a passagem dos dutos.

FIGURA 24 – FLUXO DE DADOS DO SIMULADOR



O consumo total de eletricidade destacado na Figura 24 pode ser suprido total ou parcialmente de duas maneiras, quais sejam: geração interna ou externa (Figura 25).

FIGURA 25 – POSSIBILIDADES PARA SUPRIMENTO DA DEMANDA TOTAL DE ENERGIA ELÉTRICA



A Tabela 16 mostra os equipamentos adotados em cada etapa de pós-colheita e que foram utilizados nos cálculos do simulador, bem como a potência necessária para seu funcionamento e sua capacidade de operação.

TABELA 16 – EQUIPAMENTOS ADOTADOS EM CADA ETAPA DA PÓS-COLHEITA

ETAPA	EQUIPAMENTO OU MAQUINA	FABRICANTE	CAPACIDADE	POTÊNCIA NECESSÁRIA
Pré-limpeza	Máquina LC 40/200	Kepler Weber	300 ton/h	33,5 cv
Secagem	Secador KW 100-DRM	Kepler Weber	100 ton/h (soja) 75 ton/h (milho)	60 cv
Limpeza	Máquina DEITA 100	Kepler Weber	225 ton/h	2,95 cv
Armazenamento	Silos 6020	Kepler Weber	3886 ton	-
	Armazéns “fundo V”		50.000 ton	-
Aeração ⁽¹⁾	Ventiladores centrífugos	-	-	5 cv

(1) Vazão de ar de 0,5 m³/min.ton com um tempo de aeração de 40h (HARA et al., 2002). Adotou-se um ciclo de aeração a cada mês armazenado.

Para cálculo da demanda térmica necessária para secar uma tonelada de grão, por percentual de umidade retirada, utilizou-se como base para os cálculos o GN, por ser o combustível que apresenta uma melhor combustão. O valor da demanda térmica foi calculado pelo programa desenvolvido no *Interactive Thermodynamics* (IT) (Apêndices 2 e 3), admitindo-se condições ideais de combustão (eficiência de 99%). O valor da demanda térmica foi compatível com o valor calculado por ERRERA et al. (2002) e com dados de catálogo de fabricantes.

A Tabela 17 mostra as eficiências adotadas para cálculo da demanda energética dos demais combustíveis estudados, de acordo com tecnologia usada na combustão.

TABELA 17 – EFICIÊNCIAS DE COMBUSTÃO E PCI DOS COMBUSTÍVEIS

COMBUSTÍVEL	TECNOLOGIA	EFICIÊNCIA** (%)	PCI (GJ/TON)	REFERÊNCIAS
GN*	Queimador GN	99,0	40,02	1
Óleo Diesel	Fornalha a diesel	95,0	42,00	2
Lenha	Fornalha a lenha	80,0	15,43	3
GLP*	Queimador GLP	97,0	100,0	4
Biodiesel	Fornalha a diesel	85,5	37,20	5

* PCI em MJ/Nm³.

** Eficiências típicas das tecnologias adotadas.

FONTE: (1) GASPETRO (2005)

(2) WANG E ZHANG (2006)

(3) GARCIA (2002)

(4) IPCC (1997)

(5) KALTSCHMITT et al. (1997)

Em relação aos cálculos da biomassa necessária para suprimento da demanda térmica, considerou-se o tipo de lenha de reflorestamento mais aproveitada na agroindústria – Eucalipto (em função do seu rápido ciclo de crescimento) e avaliou-se também o uso da Bracatinga (espécie de rápido crescimento existente na região metropolitana de Curitiba). A Tabela 18 mostra os parâmetros utilizados para cada espécie.

TABELA 18 – PARÂMETROS ADOTADOS NOS CÁLCULOS DE BIOMASSA

LENHA	PCI (GJ/ton)	DENSIDADE (kg/m ³)	PRODUTIVIDADE (m ³ /ha.ano)
Bracatinga (20 % umidade)	19,12 ⁽¹⁾	550 ⁽¹⁾	36,0 ⁽¹⁾
Eucalipto (20% de umidade)	15,43 ⁽²⁾	550 ⁽²⁾	33,6 ⁽³⁾

FONTE: (1) CARVALHO (2002)

(2) GARCIA (2002)

(3) IPEF (1988)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo realizou-se um estudo de caso do Estado do Paraná através do desenvolvimento de cenários para o setor agroindustrial.

Os parâmetros secundários da ACV do capítulo anterior foram novamente avaliados, pois, devido ao efeito escala, estes parâmetros podem se tornar significativos.

Para quantificação das emissões procurou-se seguir os mesmos princípios da ACV do capítulo anterior.

Diante dos cenários criados, apresentaram-se algumas alternativas, energéticas para suprimento da demanda térmica, com intuito de se obter os menores impactos ambientais.

Para cálculos dos resultados para estes cenários, utilizou-se o simulador desenvolvido neste trabalho.

4.1 ESTUDO DE CASO DO ESTADO DO PARANÁ

Nos cenários idealizados considerou-se o Estado do Paraná com as características apresentadas no item 2.5.6 da revisão bibliográfica

Cenário 1

Neste primeiro cenário, considerou-se apenas a produção de soja que foi de 9.541.300 toneladas na safra 04/05 (CONAB, 2005), pelo motivo da soja ser o grão mais importante do complexo agroindustrial brasileiro, do ponto de vista da produção e exportação.

A soja foi colhida com 18% b.u. e seca até 13% b.u., seguindo as recomendações da EMBRAPA.

Não se admitiu o uso de lenha nativa para geração de energia térmica, devido a sua escassez no PR. Portanto, avaliou-se apenas o uso de lenha de áreas de reflorestamento de espécies exóticas (eucalipto) e de espécies nativas (bracatinga), e o

uso de GN²⁴.

No caso do uso da lenha, foram admitidos sistemas silviculturais com produtividades elevadas (33,6 m³/ha.ano para eucalipto e 36 m³/ha.ano para bracatinga). Além disto, adotou-se uma distância de 100 km das áreas de reflorestamento até as unidades de pré-processamento. O transporte foi realizado por caminhões conforme Tabela 15 do capítulo anterior.

Os preços dos combustíveis para este cenário foram R\$ 50,00/m³.st de lenha e R\$ 1,10/m³ de GN (preço médio de acordo com a tabela de preços industrial da Companhia Paranaense de Gás).

A energia elétrica para movimentação dos equipamentos foi gerada por hidrelétricas.

Na alternativa *A1* utiliza-se somente GN, já na *A2* só lenha e na alternativa *A3* considerou-se o uso de GN e lenha em conjunto (50% para cada combustível) (Tabela 19). Para a alternativa 3 existem duas possibilidades que são a queima em separado dos energéticos, como também a queima combinada. Exemplos de estudos sobre esta questão podem ser encontrados em RODRIGUES et al. (2003).

TABELA 19 - DADOS DE ENTRADA DAS ALTERNATIVAS 1, 2, 3

ENTRADAS	<i>A1</i>	<i>A2</i>	<i>A3</i>
Quantidade de grãos úmidos (ton)	9.541.300	9.541.300	9.541.300
Tipo de grão	soja	soja	soja
Umidade de Chegada (%)	18	18	18
Umidade de Saída (%)	13	13	13
Combustível utilizado	GN	Lenha	Lenha e GN
Armazenamento (meses)	10	10	10
Armazenamento (equipamento)	armazéns	armazéns	armazéns

Os resultados das simulações das três alternativas dentro do cenário 1 são apresentados na Tabela 20.

²⁴ Levando em consideração uma ampliação da área de abrangência do Gasoduto Bolívia-Brasil (GASBOL), tornando possível o uso desta fonte primária de energia na maioria das unidades de processamento de grãos.

TABELA 20 - DADOS DE SAÍDA DAS ALTERNATIVAS 1, 2, 3

SAÍDAS	A1	A2	A3
Emissões Atmosféricas (ton)	GN	lenha	Lenha e GN
CO ₂ ^{eq}	141.076	13.000	86.000
SO ₂ ^{eq}	63	130	84
Resíduos Sólidos da Combustão (kg)	0	nd	nd (L) 0 (GN)
Energia Térmica demandada (GJ)	2.090.778	2.613.472	2.352.126
Potência Elétrica demandada (MW)	2,38	2,38	2,38
Quantidade de grãos secos (ton)	9.064.235	9.064.235	9.064.235
Consumo de combustível (Nm ³ ou m ³ st)	52.236.809	248.523 (B) 307.956 (E)	124.261 (B) 153.978 (E) 26.118.404 (GN)
Armazenamento ⁽¹⁾ (nº. de armazéns)	181	181	181
Área de reflorestamento (ha)	na	7.043 (B) 9.351 (E)	3.451 (B) 4.582 (E) na (GN)
Custo com Combustível (R\$)	57.460.490	12.426.173 (B) 15.397.825 (E)	6.213.086 (B) 7.698.912 (E) 28.730.245 (GN)

na - não se aplica

nd - não disponível

B - Bracatinga

E - Eucalipto

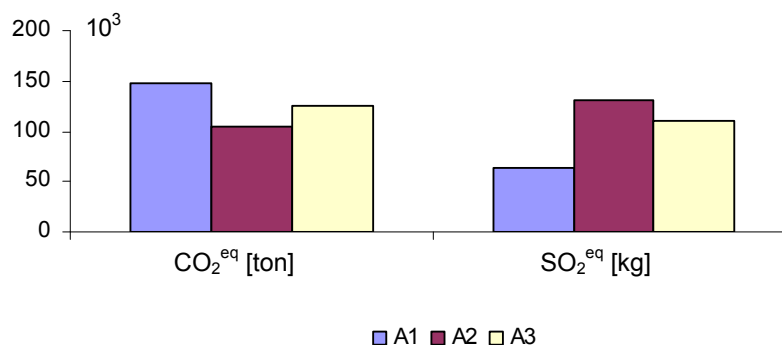
L - Lenha

GN - Gás Natural

(1) Armazéns graneleiros de 50.000 toneladas

As Figuras 26 e 27 apresentam os resultados da Tabela 20 em forma de gráficos comparativos.

FIGURA 26 – EMISSÕES ATMOSFÉRICAS DAS ALTERNATIVAS PROPOSTAS

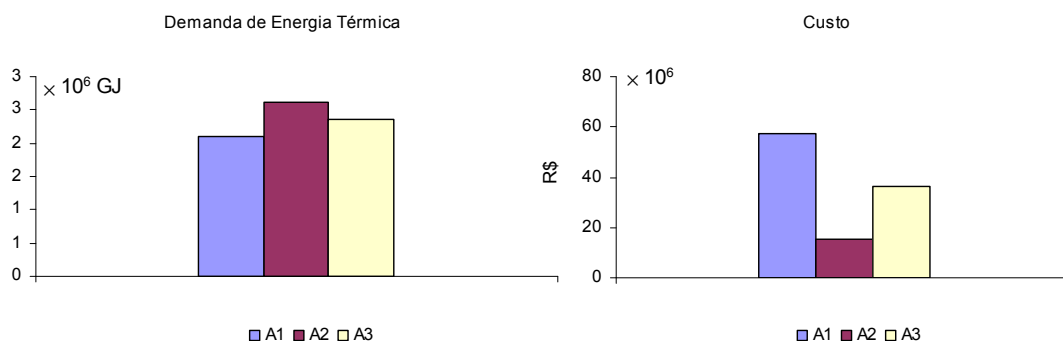


NOTA: As emissões de lenha mostradas são as emissões líquidas, considerando o balanço de carbono, conforme item 3.4.8.

Observa-se na Figura 26 que a alternativa que considera a combinação de energéticos (lenha e GN) aparece como um meio termo entre as emissões de CO_2^{eq} e SO_2^{eq} , ou seja, potencial de aquecimento global e de acidificação.

Um ponto relevante na última linha da Tabela 20 diz respeito aos custos de cada alternativa estudada para este cenário. A Figura 27 apresenta a relação entre a demanda de energia térmica necessária e o custo de cada alternativa.

FIGURA 27– DEMANDA DE ENERGIA TÉRMICA E CUSTO DE CADA ALTERNATIVA



Pode-se observar na Figura 27 que as três alternativas demandam quantidades próximas de energia térmica (diferença imposta pela eficiência na tecnologia de combustão). Porém em relação aos custos a alternativa a GN (A1) mostrou-se mais onerosa que a lenha (A2) e híbrida (A3).

Outro ponto importante a se ponderar são as áreas de reflorestamento necessárias para este cenário, o valor apresentado na Tabela 20 é a soma dos sete talhões mostrados na Figura 28.

Esses talhões devem estar em diferentes estágios de crescimento (Figura 28). Isto deve ocorrer para que se atinja uma oferta sustentável de lenha, pois em cada ano agrícola o talhão com os eucaliptos no sétimo ano de crescimento será cortado.

Segundo dados do IBGE (2003), a área de reflorestamento da A2 representa 0,05% do Estado do Paraná e cerca de 38% das áreas de florestas energéticas plantadas do Paraná. Ou seja, para suprimento de lenha existem duas opções, deslocar a lenha das áreas já existentes para o setor agroindustrial ou, caso essas áreas já estejam comprometidas com outros setores produtivos, aumentar em 38% as áreas existentes.

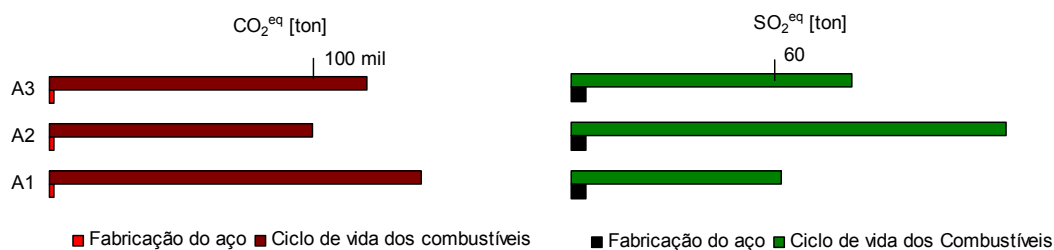
FIGURA 28 – DISPOSIÇÃO DOS TALHÕES PARA UMA OFERTA SUSTENTÁVEL DE LENHA



As áreas dos talhões podem ter influência no regime hidrológico da localidade escolhida para o plantio. De acordo com a seção 2.5.8 (impactos hidrológicos de áreas de reflorestamento) o consumo de água por eucaliptos durante a fase de crescimento varia de 800 a 1200 l/m². Portanto, os 9.351 ha necessários neste cenário consumiriam em torno de 13,5 milhões de m³ por ano. Comparando este dado à média de precipitação anual do Estado do Paraná (1800 mm, Anexo 3) (IAPAR, 2006), esta plantação de eucalipto demandaria em torno de 8% deste montante de água. Portanto, é necessário um estudo detalhado das implicações deste consumo no regime hidrológico.

Além do estudo da análise das áreas de reflorestamento, fez-se também uma avaliação da contribuição das emissões da fabricação do aço e geração de eletricidade, para avaliar se essas emissões influenciam o resultado final da nova análise. Pois o efeito escala (produção) já apresenta influência significativa. As Figuras 29 e 30 mostram esses resultados.

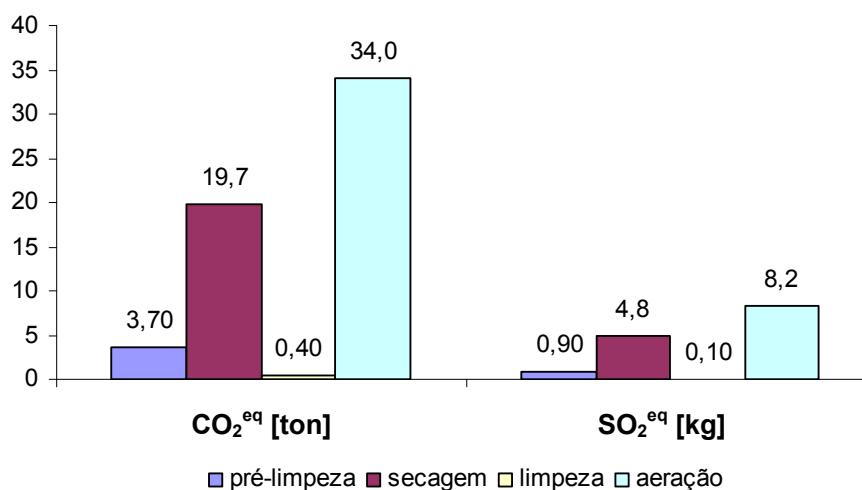
FIGURA 29 – CONTRIBUIÇÃO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS NA FABRICAÇÃO DO AÇO PARA CONSTRUÇÃO DOS EQUIPAMENTOS



Como mostrado na Figura 29, as emissões para fabricação do aço para construção dos equipamentos nessa escala de produção já apresentam uma quantidade significativa, apesar de ainda serem relativamente baixas quando comparadas com o total do ciclo de vida dos combustíveis (aproximadamente 2.000 ton de CO_2^{eq} e 4 ton de SO_2^{eq} para secagem).

Para o caso da geração de eletricidade, observa-se que as emissões permanecem baixas para a atual escala de produção (Figura 30) (desprezível em comparação as emissões da Figura 26). Isso é devido a pequena parcela de uso de energia elétrica na fase de pós-colheita de grãos e, também, à origem hidroelétrica da energia.

FIGURA 30 – CONTRIBUIÇÃO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS NA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE PARA MOVIMENTAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

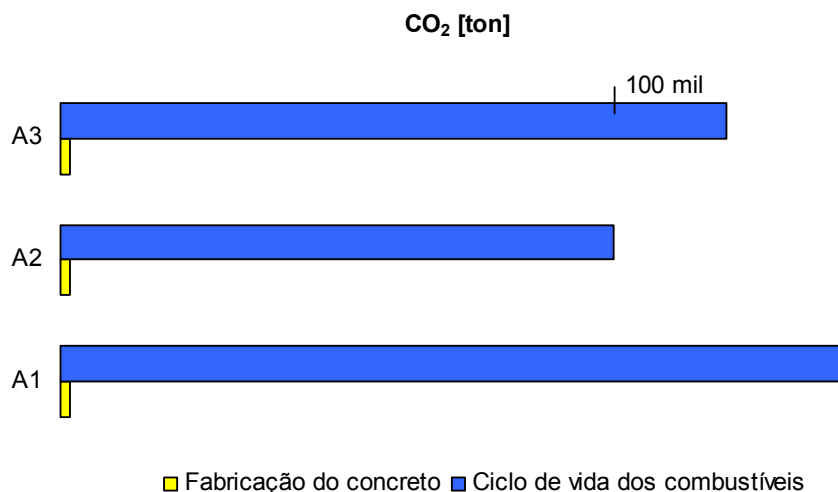


As emissões atmosféricas em relação ao concreto estimado para a fundação dos armazéns e secadores, também foram avaliadas. O valor das emissões atmosféricas de CO_2 estão apresentadas na Figura 31, e já mostraram uma maior contribuição.

Essas emissões aumentaram a quantidade de CO_2^{eq} em torno de 2.000 ton, correspondendo a aproximadamente 1,45% das emissões do ciclo de vida dos

combustíveis.

FIGURA 31 – CONTRIBUIÇÃO DE CO₂^{eq} DA FABRICAÇÃO DO CONCRETO PARA AS FUNDAÇÕES DOS EQUIPAMENTOS.



Cenário 2

Neste segundo cenário, a produção de grãos considerada foi a de soja e a de milho do Estado, 17.885.500 toneladas na safra 04/05 (CONAB, 2005).

A umidade da soja foi reduzida de 18% b.u. para 13% b.u., já o milho teve sua umidade reduzida de 24% para 13% (segundo recomendações da EMBRAPA e CONAB).

Para suprimimento da demanda energética necessária para este cenário considerou-se o uso de todos os energéticos citados ao longo deste trabalho.

Porém, como no cenário 1, não se levou em consideração uso de lenha nativa, admitindo total escassez deste recurso no Paraná. A distância de transporte da lenha foi aumentada para 200 km e para os demais combustíveis permaneceu 60 km.

Manteve-se o mesmo preço do metro cúbico da madeira e do GN. Já para o GLP considerou-se R\$ 5,41/m³ (ANP, 2005c), para o óleo diesel R\$ 1,9 o litro (ANP, 2005c), e para o biodiesel R\$ 1,20 o litro (ECO ÓLEO, 2006).

Neste cenário também se admitiu o fornecimento de energia elétrica por meio de hidrelétrica.

As alternativas propostas (Tabela 21) para este cenário foi o uso de cada

combustível em 100% das unidades de pré-processamento e o uso de 50% de lenha e 50% de GN (semelhante a *A3* do cenário 1).

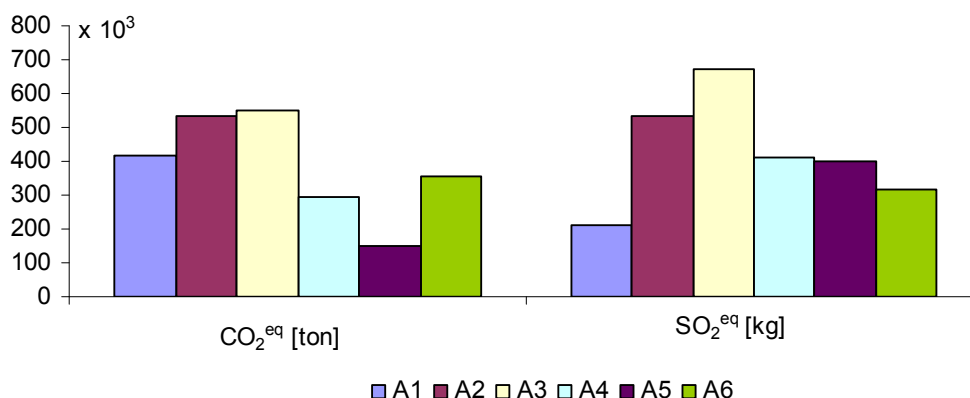
TABELA 21 – DADOS DE ENTRADA DAS ALTERNATIVAS 1, 2, 3, 4, 5, 6

<i>A1</i>	<i>A2</i>	<i>A3</i>	<i>A4</i>	<i>A5</i>	<i>A6</i>
GN	GLP	OD	Lenha	Biodiesel	GN e Lenha

Como o milho é colhido no campo com umidade maior, o consumo de combustível aumenta consideravelmente, consequentemente aumentando as emissões atmosféricas.

A Figura 32 apresenta as emissões de CO_2^{eq} e SO_2^{eq} para todas as alternativas.

FIGURA 32 – EMISSÕES ATMOSFÉRICAS PARA AS ALTERNATIVAS PROPOSTAS



As emissões de GEE da lenha (*A4*) e biodiesel (*A5*) foram menores em função do balanço de CO_2^{eq} (item 3.4.8). Porém, as grandes áreas plantadas das duas culturas devem ser avaliadas.

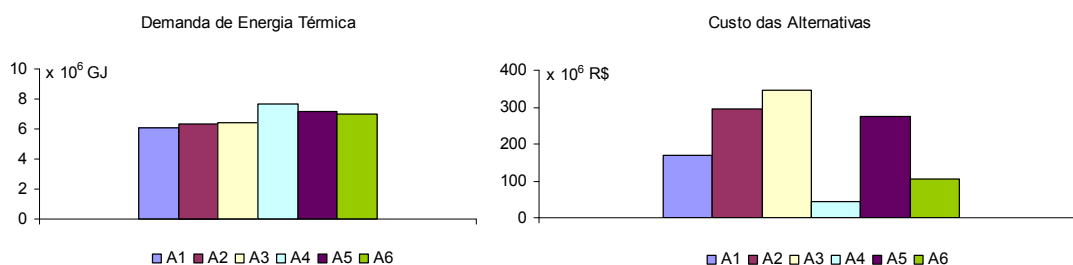
No caso da lenha, as grandes áreas de reflorestamento de eucalipto, podem gerar diminuição de biodiversidade e grande consumo de água. Somente para este cenário, a área necessária de reflorestamento (26.798 ha) corresponde a 0,13% do Estado do Paraná e é superior a atual área de reflorestamento existente no Estado (IBGE, 2003). Isto mostra que se a agroindústria do Paraná utilizasse somente lenha, no pré-processamento (sem considerar a lenha utilizada para extração de óleo de soja e produção de derivados), existiria um déficit de lenha de reflorestamento da ordem de

12%. Este problema é ainda mais agravado uma vez que existem outros setores industriais dependentes dessas áreas de reflorestamento, por outro lado, é amenizado quando se faz o uso de resíduos de madeireiras, celulose e papel.

Além dos fatos citados acima, o consumo de água pelos hectares de eucaliptos necessários para este cenário seria de 39 milhões de m^3 por ano. Como o consumo de água e a precipitação são proporcionais a área plantada, este consumo também fica em cerca de 8% da precipitação média anual no Estado do Paraná (semelhante ao cenário 1).

Em relação ao custo, a Figura 33 mostra os valores obtidos para cada alternativa.

FIGURA 33 – DEMANDA DE ENERGIA TÉRMICA E CUSTO DE CADA ALTERNATIVA



Com relação à fabricação do aço, as emissões mostradas na Figura 34 aumentam proporcionalmente ao total de grãos a serem secos, portanto mantendo o mesmo comportamento do cenário 1 em relação a média das emissões do ciclo de vida dos combustíveis.

FIGURA 34– EMISSÕES DE CO_2^{eq} e SO_2^{eq} NA FABRICAÇÃO DO AÇO PARA OS EQUIPAMENTOS

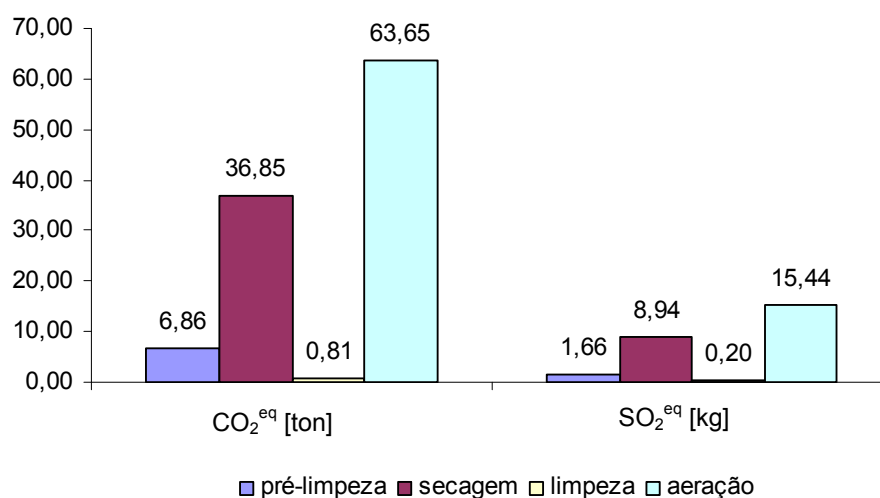


As emissões de CO_2^{eq} da fabricação do aço para os equipamentos deste cenário foram menores que 1%, em média, comparando com a media das emissões do ciclo de vida. Esse percentual representa aproximadamente CO_2^{eq} 3.500 ton.

Já para o SO_2^{eq} as emissões representaram um acréscimo de 2%, ou aproximadamente 7,5 ton em relação às emissões dos combustíveis.

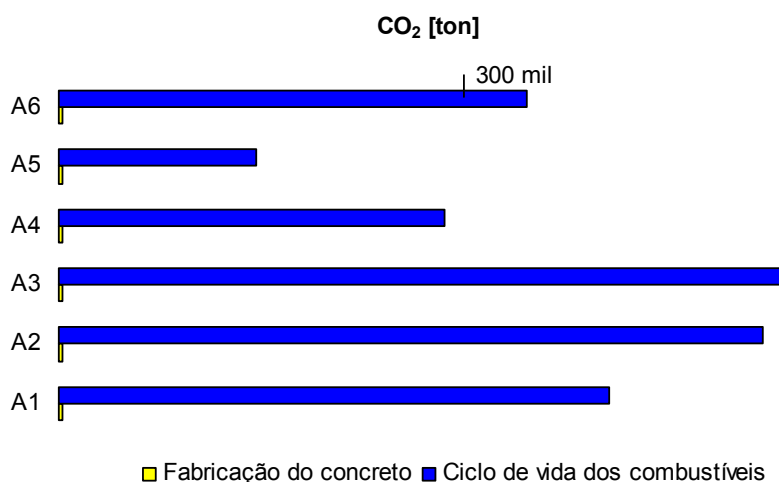
Como feito para a ACV e para o cenário 1, a geração de energia elétrica e fabricação de concreto tiveram suas emissões quantificadas neste cenário e as Figuras 35 e 36 apresentam os resultados.

FIGURA 35 – EMISSÕES ATMOSFÉRICAS NA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE PARA MOVIMENTAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS



NOTA: Em comparação às emissões no ciclo de vida dos combustíveis, ainda foram insignificantes.

FIGURA 36 – EMISSÕES ATMOSFÉRICAS NA FABRICAÇÃO DO CONCRETO PARA AS FUNDAÇÕES DOS EQUIPAMENTOS



Analizando as Figuras 34, 35 e 36, mais uma vez nota-se a pouca influência das emissões atmosféricas dos parâmetros secundários em relação as emissões do ciclo de vida dos combustíveis.

Entre outros motivos, isso é consequência da vida média dos equipamentos e, também, pelo fato de que insumos como aço, concreto e eletricidade, são fabricados em grande escala.

Cenário 3

Neste último cenário procurou-se admitir melhores formas de uso de fontes primárias de energia, utilizando configuração baseada nos princípios de exergia (item 2.5.9). Para se atingir este objetivo a cogeração foi adotada para provisão de energia térmica e elétrica.

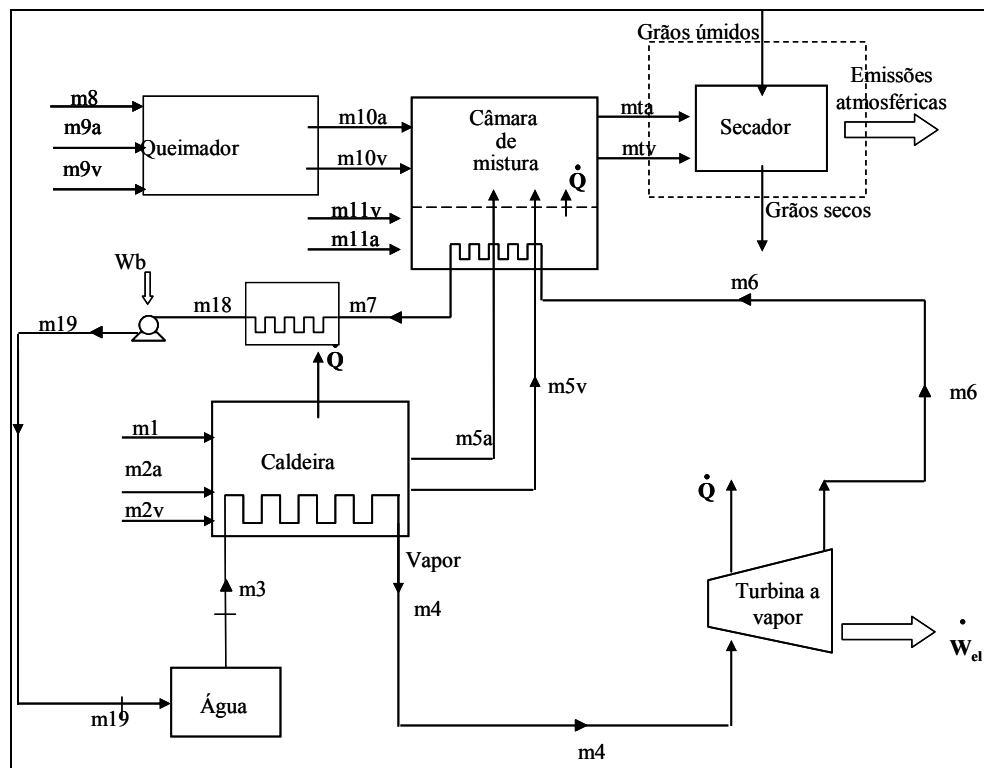
Uma configuração típica de cogeração com ciclo a vapor²⁵, utilizando o GN, (Figura 37) foi a escolhida para as simulações.

Para obtenção dos resultados deste cenário, realizou-se uma simulação de uma planta de secagem com capacidade de secagem de 100 ton/h, utilizando um ciclo de cogeração a vapor (Figura 37) e adotando o GN como combustível. A simulação foi realizada utilizando o aplicativo Interactive Thermodynamic (IT).

O volume de controle do secador (representado pelo pontilhado) não foi considerado para esta simulação. Para isto adotou-se uma vazão típica de ar de secagem de 80 kg/s (STANESCU et al. 2003; FILIPINI et. al, 2003). Os fluxos mássicos estão mostrados na Figura 37, as equações e os parâmetros adotados nos cálculos estão no Apêndice 2. O algoritmo desenvolvido no IT está apresentado no Apêndice 3.

²⁵ Adotou-se as mesmas características da planta de cogeração a GN do LEIS

FIGURA 37 – CICLO DE COGERAÇÃO ADOTADO



NOTA: O significado dos índices estão abaixo:

- | | |
|--|---|
| 1 - Combustível da caldeira (GN) | 8 - Combustível do queimador (GN) |
| 2 - Ar ambiente para combustão na caldeira | 9 - Ar ambiente para combustão no queimador |
| 3 - Água para geração de vapor (25°C) | 10 - Gases de combustão do queimador |
| 4 - Vapor (1400 kPa e 400°C) | 11 - Vazão de ar ambiente |
| 5 - Gases de combustão da caldeira | t - Ar de secagem |
| 6 - Vapor (200 kPa e saturado) | 18 - Água a 25°C |
| 7 - Água a 100°C e 200 kPa | 19- Água a 1400 kPa |

As simulações consideraram desde o caso de referência, sem cogeração, até cogeração com paridade térmica de 100% com a secagem.

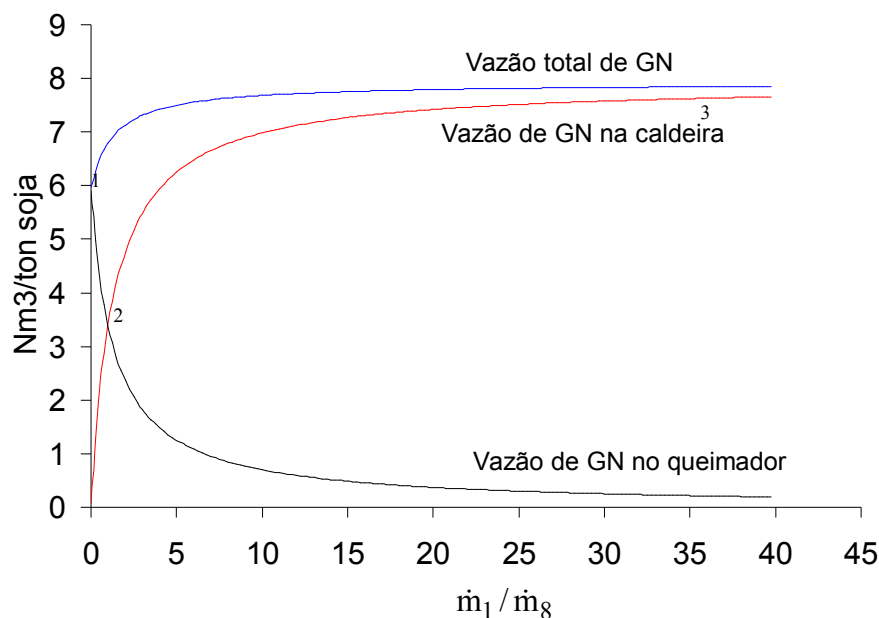
Após a simulação desta planta de cogeração foram realizadas análises energéticas, ambientais e exergéticas.

Análise energética

O consumo de GN com a cogeração em 100% de paridade térmica passa de aproximadamente 6 para 8 Nm³/ton de soja.

A Figura 38 apresenta as curvas de consumo de GN com cogeração.

FIGURA 38 – COMPARAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM DE REFERÊNCIA E A PLANTA COM COGERAÇÃO



NOTA: \dot{m}_1 / \dot{m}_8 significa a razão entre a queima de GN na caldeira (\dot{m}_1) e no queimador (\dot{m}_8)

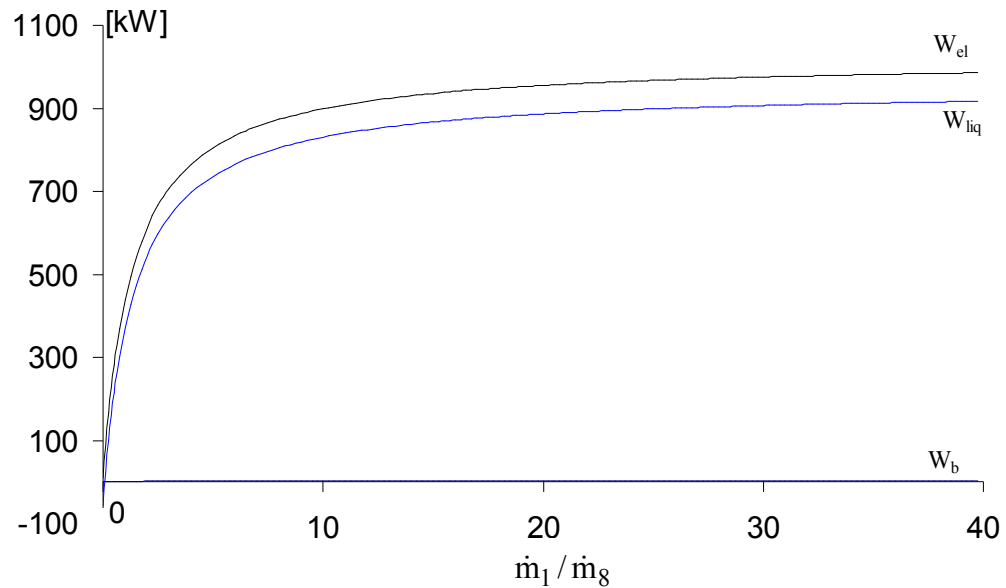
O extremo “1” representa uma planta típica (referência), utilizando apenas combustão direta de GN através do queimador, e o extremo “3” representa praticamente paridade térmica total, com aproveitamento de todos os rejeitos térmicos do ciclo de potência.

Observa-se na Figura 38 que, à medida que ocorre maior uso de cogeração, a queima de GN no queimador diminui. Em paridade térmica (ponto 3), praticamente não se queima combustível no queimador, apenas na caldeira. O consumo total de GN (representado pela linha azul) aumenta em 2 Nm³/ton de soja devido a geração de eletricidade.

A Figura 39 mostra a produção de eletricidade pela cogeração e a eletricidade líquida, ou seja, após descontar a quantidade de eletricidade calculada para operação da bomba de água²⁶ (66kW).

²⁶ não foi considerada a energia gasta pelas máquinas de pré-limpeza e pelos ventiladores do secador

FIGURA 39 – POTENCIA ELÉTRICA GERADA PELA COGERAÇÃO

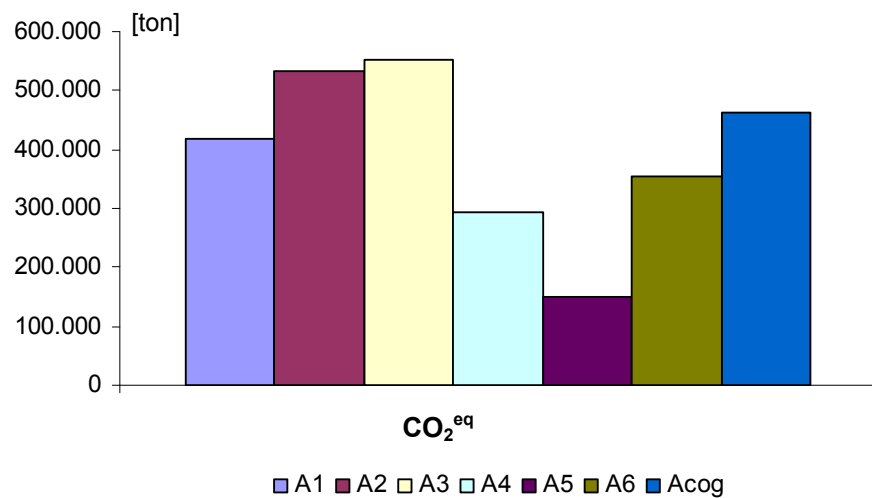


Análise Ambiental

A Figura 40 compara as emissões de CO_2 das alternativas do cenário 2 com as emissões do cenário 3 (representadas pelo termo *Acog*).

Ao analisar a Figura 40 nota-se que as emissões atmosféricas com o uso de cogeração são mais altas do que uma planta típica também usando GN. Porém, ao se analisar outros combustíveis (GLP e OD) a cogeração foi menos impactante.

FIGURA 40 – COMPARAÇÃO ENTRE O CENÁRIO 3 E AS ALTERNATIVAS DO CENÁRIO 2



Ao se analisar as emissões diretas da cogeração percebe-se um aumento, quando comparadas as emissões de uma planta típica. Entretanto, ao se avaliar a eletricidade gerada pela cogeração, e ao se contabilizar as emissões atmosféricas que deixariam de ser emitidas, caso essa eletricidade fosse gerada em centrais térmicas, a cogeração passa a ser uma alternativa de melhor desempenho.

A afirmação acima está de acordo com a United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), que considera a cogeração como uma metodologia para projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

Análise exergética

Após a simulação da planta com cogeração foi calculada sua eficiência exergética, definida aqui como a exergia útil obtida no sistema em relação à exergia disponível, ou seja:

$$\eta_{II} = \frac{\text{Exergia útil}}{\text{Exergia disponível}} \quad (6)$$

Para a planta estudada, o numerador é composto pela potência elétrica gerada adicionada do fluxo exergético do ar de secagem. O denominador consiste no fluxo exergético associado ao GN.

A exergia específica (ex_t) do ar de secagem foi calculada com base na massa de ar seco conforme MORAN (1982):

$$ex_t = T_{amb} \{ (c_p + w_t \times c_{pv}) [T_t/T_{amb} - 1 - \ln(T_t/T_{amb})] + (1 + \tilde{w}) R_a \ln(p/p_0) \} + R_a T_{amb} \{ (1 + \tilde{w}) \ln(1 + \tilde{w}_o / 1 + \tilde{w}) + \tilde{w} \ln(\tilde{w} / \tilde{w}_o) \} \quad (7)$$

onde,

- ✓ $(1 + \tilde{w}) R_a \ln(p/p_0) = 0$, considerou-se processo isobárico.
- ✓ T_t , T_{amb} , c_p , w_t , estão descritos no Apêndice 2.
- ✓ c_{pv} é o calor específico do vapor d'água contido no ar de secagem.
- ✓ \tilde{w} e \tilde{w}_o são as umidades absolutas do ar de secagem e do ar ambiente em base molar, respectivamente.

Desse modo a exergia do ar de secagem foi calculada como $Ex_t = m_{ta} \times ex_t$.

O valor da eficiência exergética para a planta estudada foi em torno de 18% para o caso de referência (apenas o uso do queimador do secador).

Antes de se comparar com o valor obtido em FILIPINI et al. (2003) foi necessário recalcular a eficiência exergética daquele trabalho, segundo a definição da equação (6). O novo resultado foi de 15%.

Os valores das eficiências estão suficientemente em concordância quando consideradas as diferenças em alguns parâmetros, como estado de referência e condições de operação.

No outro extremo, ao se considerar cogeração com paridade térmica com a secagem, a eficiência exergética da planta alcançou os 31%.

Existem outros ciclos de cogeração que podem apresentar desempenho melhor que o adotado neste trabalho. O quão melhor este desempenho pode-se tornar leva a questionar qual seria o limite superior para eficiência exergética de uma planta de secagem com cogeração.

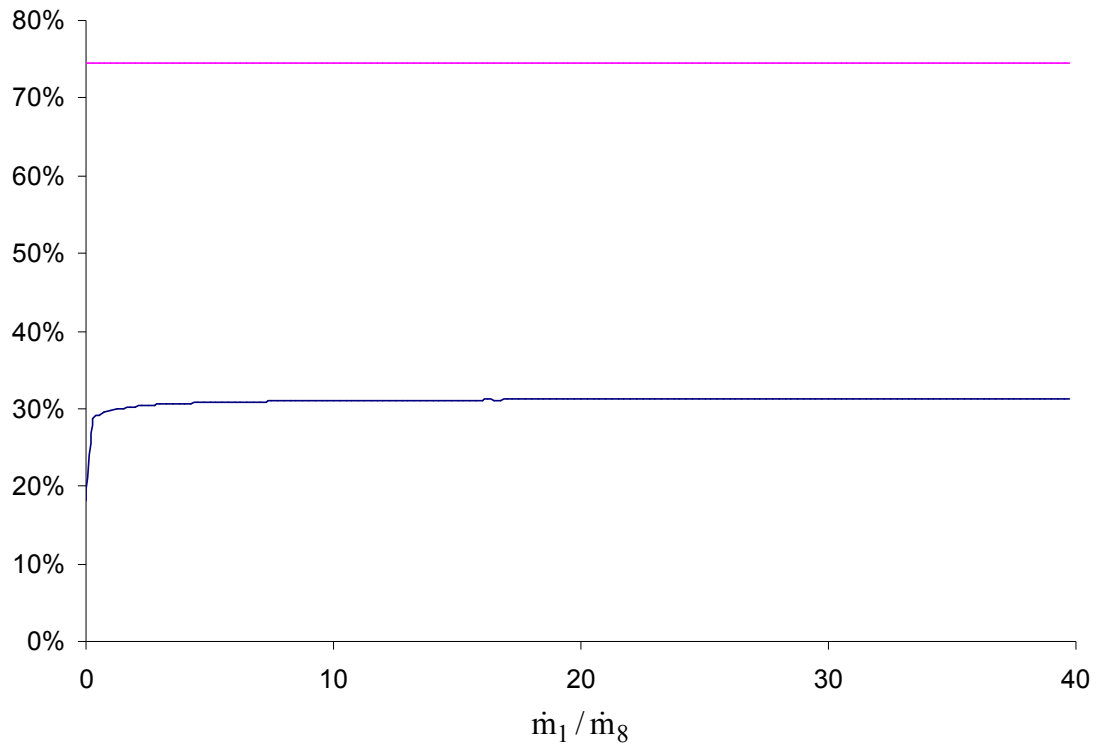
Para se determinar este teto considerou-se o sistema clássico de máquina térmica endo-reversível conforme ilustrado na Figura 8. A eficiência energética daquele sistema é melhor estimada pela eficiência de Novikov (e.g. BEJAN, 1997), a saber $\eta_I = 1 - (T_{amb}/T_{adc})^{1/2}$, onde T_{adc} é a temperatura adiabática de chama (2.328 K) e T_{amb} (298,15 K). A eficiência de Novikov foi de 64 %.

Ao fazer novamente paridade térmica entre o calor rejeitado do ciclo de potência com a demanda energética para a secagem, determina-se a potência elétrica W_{el}^C máxima que poderia ser gerada numa planta ideal: cerca de 1.490 kW.

A eficiência da planta ideal foi também calculada pela equação (6). Assim, o limite superior de eficiência exergética foi de 74%.

A Figura 41 mostra o desempenho da eficiência exergética até o ponto de paridade térmica.

FIGURA 41 – EFICIÊNCIA EXERGÉTICA DA PLANTA DE SECAGEM



Com a cogeração a eficiência exergética da planta tem um rápido crescimento e depois apresenta um comportamento assintótico com a razão entre as massas de GN queimadas na caldeira e no queimador.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Ao final deste estudo podem-se notar dois pontos importantes na questão da sustentabilidade energo-ambiental da agroindústria paranaense:

- 1) os impactos ambientais na fase de pós-colheita de grãos e,
- 2) a atual concepção de uso das fontes primárias de energia.

A avaliação de ciclo de vida (ACV) demonstrou que as emissões atmosféricas significativas na fase de pós-colheita de grãos são decorrentes do uso dos combustíveis para geração de energia térmica para secagem.

Os gases de efeito estufa foram menores quando do uso de fontes renováveis (lenha e biodiesel). Já para o caso dos gases acidificantes as menores emissões ocorreram no uso do GN.

As emissões de gases de efeito estufa podem ser compensadas através do uso de fontes renováveis de energia térmica, como lenha ou biodiesel, em projetos contínuos de produção e oferta destes energéticos.

A escala de produção de grãos do Paraná demandará grandes áreas de reflorestamento para uma oferta sustentável de lenha. Se somente lenha fosse utilizada, existiria (hoje) um déficit de florestas plantadas para este fim da ordem de 12%. O levantamento de campo recente demonstrou que na faixa de 80 a 90% da demanda térmica é suprida por lenha.

Outro ponto que deve ser ressaltado e que contribuiria para atingir a sustentabilidade energo-ambiental seria o uso racional dos recursos energéticos.

Este trabalho mostrou que, com uma mudança na atual concepção de obtenção de energia térmica, é possível um melhor aproveitamento dos energéticos.

A cogeração é um dos meios que podem ser usados para tal fim. Pois pode-se realizar a secagem com os rejeitos do ciclo de potência.

A simulação e a análise exergética demonstraram que mesmo numa configuração simples de cogeração, a eficiência exergética pode ser duplicada, embora ainda fique na metade do limite teórico.

Mesmo com cogeração, a redução de emissões (principalmente de gases de efeito estufa) nem sempre será obtida, pois a eletricidade brasileira tem origem hidráulica. A redução de emissões seria alcançada caso a tendência de introdução de centrais termelétricas (CTEs) a gás natural se confirme. As unidades de secagem com cogeração poderiam suprir parte da demanda de despacho das CTEs.

Portanto, ao se avaliar a sustentabilidade energo-ambiental com uso da lenha para agroindústria, novas questões surgem, a saber:

- ✓ Do ponto de vista da oferta de lenha para geração de energia térmica para Agroindústria, o Estado do Paraná pode chegar a ser auto-sustentável?
- ✓ Se atualmente colheita e secagem dos grãos têm sido realizadas dentro das condições recomendadas pela EMBRAPA e CONAB – levando a um menor consumo de energéticos?
- ✓ Qual seria a participação da Agroindústria na matriz termo-energética do Estado do Paraná?
- ✓ Qual o papel de resíduos de madeira e agrícolas na complementação da lenha?
- ✓ Quantificar e comparar as outras fontes de demanda de energia térmica (processos industriais que utilizam lenha), como por exemplo, qual a demanda térmica no próprio processamento dos grãos (extração de óleo, produção de farelo, lecitina e derivados)?
- ✓ Locais adequados para plantios de espécies de reflorestamento como eucalipto?

Por fim, para que o agronegócio paranaense e brasileiro de grãos não fique limitado e ainda possa atingir a sustentabilidade energo-ambiental é necessário que se estude as questões fundamentais da fase de pós-colheita, como por exemplo, os impactos ambientais decorrentes da alta demanda térmica para secagem de grãos.

RECOMENDAÇÕES

Como recomendações para futuras pesquisas e trabalhos acadêmicos sugerem-se alguns pontos, tais como:

- ✓ Ampliação do escopo da ACV;
 - considerar mais impactos ambientais como: contaminação e degradação do solo e poluição hídrica.
- ✓ Aprofundamento dos impactos hidrológicos das áreas de reflorestamento;
 - interferências na infiltração, escoamento superficial e subterrâneo, interceptação.
- ✓ Estudo de outros ciclos de cogeração para plantas de secagem;
 - ciclo a gás, ciclo combinado. Cálculo de parâmetros adotados para este estudo.
- ✓ Análise de outros combustíveis e combinações destes;
 - óleo combustível, resíduos de madeiras, bagaço de cana, entre outros.
- ✓ Aplicação do estudo para outros Estados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOVE. **Capacidade instalada de processamento de oleoginosas**, 2005. Disponível em: <<http://www.abiove.com.br>> Acesso em: 05 mar. 2005.

AHMED M. R.; CUBBAGE F. W.; SIRY J. P. **Sustainable forest management: global trends and opportunities**. Forestry Policy and Economics 7, p. 551 – 561. 2005.

ALLMARAS, R. R.; HATFIELD, J. L.; LOWERY, B.; REHM, G. W. **Ridge tillage for corn and soybean production: environmental quality impacts**. Soil & Tillage Research 48, p. 145-154. 1998.

ALONSO, P. S. R.; FERNANDES, E.; FONSECA, M. V. de A. **Natural gas in Brazil's energy matrix: demand for 1995-2010 and usage factors**. Energy Policy 33, p. 365-386. 2005.

AMBIENTE BRASIL. **Glossário**. Disponível em: <<http://www.ambientebrasil.com.br/>> Acesso em: 20 fev. 2006.

AN, G.; KIM, C.; SONG, J. **Color, texture, nutrient contents, and sensory values of vegetable soybeans [Glycine max (L.) Merrill] as affected by blanching**. Food Chemistry 83, p. 69-74. 2003.

ANGELI, A. **Mimosa scabrella (Bracatinga)**. IPEF. 2003.

ANP. **Boletim mensal do gás natural** (jan/05), 2005a. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>> Acesso em: 06 mar. 2005.

ANP. **Produção nacional de derivados de petróleo**, 2005b. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>> Acesso em: 10 mar. 2005.

ANP. **Relatório mensal de acompanhamento de mercado**. (dez/05), 2005c. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>> Acesso em: 2 fev. 2005.

ARAUJO, M. S. M. A. **Relatório de análise do mecanismo de desenvolvimento limpo – MDL**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ. 2000.

ARINZE, E. A.; SCHOENAU, G. J.; SOKHANSANJ, S. **Simulation and optimization of energy systems for in-bin drying of canola grain (rapeseed)**. Energy Conversion and Management 36, p. 41-59. 1995.

ATHANASSIADIS, D. **Energy consumption and exhaust emissions in mechanized timber harvesting operations in Sweden**. The science of the Total Environment 255, p. 135-143. 2000.

BALESTIERI, J. A. P. **Cogeração: geração combinada de eletricidade e calor**. Florianópolis: Ed. da UFSC. p. 22. 2002.

BEJAN, A. **Advanced engineering thermodynamics**. 2^a ed. - Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., p. 113 – 159. 1997.

BERG, S.; LINDHOLM E. L. **Energy use and environmental impacts of forest operations in Sweden**. Journal of Cleaner Production 13, p. 33-42. 2005.

BIAGI, J. D.; BERTOL, R.; CARNEIRO, M. C. Armazéns em unidades centrais de armazenamento. Em: LORINI, I.; MIIKE, L. H.; SCUSSEL, V. M (Ed.). **Armazenagem de grãos**. Campinas: IBG. 1ª Ed. 2002. p. 157-174.

BRAGA, B.; HESPANHOL, B.; CONEJO, I.; BARROS, J.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, M.; JULIANO, N.; EIGER, N. E. S. **Introdução à engenharia ambiental**. São Paulo: Prentice Hall. 1 ed. 2002.

BRANCO, J. E. H.; CAIXETA FILHO, J. V. **Principais gargalos para a movimentação de produtos agrícolas diferenciados no Brasil**. Grãos Brasil – Da semente ao consumo, Ano III, v. 17, p. 28-34. Dez. 2004.

BRASIL. Lei n. 4.771, de 15 de setembro de 1965. Institui o novo código florestal. **Diário oficial da união**, Brasília, 15 set. 1965.

BRASIL. Lei n. 7.803, de 15 de julho de 1989. Altera a redação da Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, e revoga as Leis nº 6.535, de 15 de julho de 1978 e 7.511, de 7 de julho de 1986. **Diário oficial da união**, Brasília, 15 set. 1989.

CAIXETA FILHO, J. V. **A qualidade nos transportes**. Frota & Cia. Ano IV, v. 7, p. 67-68, Set. 1997a.

CAIXETA FILHO, J. V. **Considerações sobre a estrutura do transporte rodoviário: o caso das cargas agrícolas**. Revista Tecnológica. ano VI, v. 58, p. 46-52. Set. 2000.

CAIXETA FILHO, J. V. **Logística e transporte no agronegócio brasileiro**. Preços Agrícolas. Piracicaba, v. 170, p. 3-5. Jan. 2001.

CAIXETA FILHO, J. V. **Transporte de produtos agrícolas: sobre a questão de perdas**. Revista de Economia e Sociologia Rural, v. 34 (3-4), p. 173-99, Jul.-Dez. 1996.

CAIXETA FILHO, J.V. **Transporte e logística no sistema agroindustrial**. Preços Agrícolas. Piracicaba, v. 119, p. 2-7. Set. 1997b.

CAMPOS, A. C.; LEONTSINIS, E. **Petróleo e derivados**. Rio de Janeiro: JR Ed. Técnica Ltda., p. 49-53; 157-162. 1989.

CARPENTIERI, M; CORTI, A.; LOMBARDI, L. **Life cycle assessment (LCA) of an integrated biomass gasification combined cycle (IBGCC) with CO2 removal**. Energy Conversion and Management 46, p. 1790–1808. 2005.

CARVALHO, P. E. R. **Cultivo da bracatinga**. Embrapa Floresta. Sistemas de Produção 6. 2002.

CHEMKHI, S.; ZAGROUBA, F.; BELLAGI, A. **Drying of agricultural crops by solar energy**. Desalination 168, p. 101-109. 2004.

CLEMENTE, A. D. **Melhoramento florestal aplicado a condições ambientais específicas**. Universidade Federal de Viçosa. Disponível em: <<http://www.ufv.br/dbg/bioano01/div04.htm>> Acesso em: 17 jan. 2006.

CNTL. **Guia de produção mais limpa: faça você mesmo**. 2005. Disponível em: <<http://www.pmaisl.com.br>> Acesso em: 22 nov. 2005.

CONAB. **Quarto levantamento de avaliação da safra 2004/2005**, abril/05, 2005. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>> Acesso em: 12 abr. 2005.

COPEL. **Balanço energético do Paraná** – ano base 2003, 2004. Disponível em: <<http://www.copel.com>> Acesso em: 20 maio 2005.

COPPE. **Projeto Jardim Camacho**: Coleta e recuperação de biogás de aterro sanitário para evitar a emissão de metano e promover a geração de energia elétrica pelo uso do biogás e biodiesel. 2004. Disponível em: <www.centroclima.org.br/biogas_biodiesel.pdf> Acesso em: 05 set. 2005.

CROTTY, R. **Grains** – more or better storage? Food Policy 4, p. 154-232. 1979. Abstract.

CURRAN, M. A. **Environmental life cycle assessment**. New York: MacGraw Hill. 1996.

D'ARCE, M. A. B. R. **Pós-colheita e armazenamento de grãos**. Piracicaba, 2004. Texto compilado (Tecnologia de Produtos Agropecuários II) – Curso de Engenharia Agrônômica, Departamento Agroindústria, alimentos e nutrição, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiros.

DAI, Y. J.; WANG, R. Z.; XU, Y. X. **Study of a solar powered solid adsorption–desiccant cooling system used for grain storage**. Renewable Energy 25, p. 417–430. 2002.

DALPASQUALE, V. A. Procedimentos essenciais de recepção e limpeza de grãos. Em: LORINI, I.; MIKE, L. H.; SCUSSEL, V. M. (Ed.). **Armazenagem de grãos**. Campinas: IBG. 1ª Ed. 2002. p. 192-212.

DEPLA. **Exportação brasileira por produto**. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comercio Exterior. 2006. Disponível em: <<http://www.desenvolvimento.gov.br/>> Acesso em: 01 mar. 2006.

DORETTI, L.; FERRARA, D.; PARVOLI G.; RELLA R.; STURARRO A. **Chemical evidence and risks associated with soybean and rapeseed meal fermentation**. Chemosphere 52, p. 1259-1262. 2003.

DUBUISSON, X.; SINTZOFF, I. **Energy and CO₂ balances in different power generation routes using wood fuels**. Biomass and Bioenergy 15, p. 379-390. 1998.

EC. **Canada's Greenhouse Gas Inventory 1990-2002**. Greenhouse Gas Division Environment Canada. 2004. Disponível em: <http://www.ec.gc.ca/pdb/ghg/1990_02_report/toc_e.cfm> Acesso em: 20 set. 2005.

ECO ÓLEO. **Custo de produção do biodiesel**. Disponível em: <<http://www.biodieselecooleo.com.br>> Acesso em: 03 fev. 2006.

EIA. **Fuel and energy source codes and emission coefficients**. Voluntary Reporting of Greenhouse Gases Program. 2003. Disponível em: <<http://www.eia.doe.gov>> Acesso em: 20 set. 2005.

EIA. **International Energy Annual**, 2002. Disponível em: <<http://www.eia.doe.gov>> Acesso em: 25 abr. 2005.

EMBRAPA. **Sistemas de produção5: tecnologia de produção de soja** – Paraná 2005. Londrina : Embrapa Soja. 1ª Ed. 2004.

EMBRAPA. **A soja**. 2005. Disponível em: <<http://www.cnpso.embrapa.br>> Acesso em: 05 ago. 2005.

EPA. **Compilation of air pollutant emission factors: Stationary Point and Area Sources**, vol. 1. 5ª ed. jan., 1995. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>> Acesso em: 20 set. 2005.

EPA. **emission factor listing for criteria air pollutants**. Emission Inventory Improvement Program. Documents series, vol. 2, jul., 2001. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ttnchie1/eiip/techreport/volume02>> Acesso em: 20 set. 2005.

ERRERA, M. R.; STANESCU G.; FILIPINI, F. A. **Relatório parcial em tecnologia de processamento de soja e o potencial de integração de cogeração para o gás natural**. Curitiba: UFPR, fev/2002. 83 p. (Finep/CTPETRO. Projeto 0660/01). Projeto concluído.

ERRERA, M. R.; STANESCU G.; FILIPINI, F. A. **Relatório parcial sobre desenvolvimento de aplicativos para estudos de viabilidade técnica-econômica do uso do GN em toda a cadeia produtiva da indústria de soja**. Curitiba: UFPR, jun/2003. 85 p. (Finep/CTPETRO. Projeto 0660/01). Projeto concluído.

ERRERA, M. R.; WILIAM A. B.; PONTE M. J. J. de S.; MARQUES, B. de A.; LOPES, K. da S. **Relatório interno das visitas técnicas às empresas do Estado do Mato Grosso do Sul**. P03-2005, GEANEX, AGROGÁS II, UFPR, Curitiba, Paraná. Set. 2005.

FAO. **Global forestry resources assessment 2000**, 2001. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. Disponível em: <<http://www.fao.org/forestry/fo/fra/index.jsp>> Acesso em: 20 maio 2005.

FAO. **Yearbook of forests products**. FAO Forestry Series nº 35, FAO Statistics Series nº 158, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, p. 243. 2002.

FEARNSIDE, P. M. **Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil**. Environmental Conservation 23, p. 23-38. 2001.

FILIPINI, F. A.; STANESCU, G.; ERRERA, M. R. **Exergy analysis of soybeans drying plants with cogeneration or trigeneration**. In: International Congress of Mechanical Engineering, 17. 2003, São Paulo/Brazil. **Anais...** São Paulo.

FOLHAONLINE. **Paralisação e filas continuam no 5º dia de protestos no porto de Paranaguá**. 23/03/2004. Disponível em: <<http://www.folha.uol.com.br>> Acesso em: 01 mar. 2006.

FURUHOLT, E. **Life cycle assesement of gasoline and diesel**. Resources, Conservation and Recycling 14, p. 251-263. 1995.

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G.A. **Hidrologia**. 2ª ed. – São Paulo: Edgard Blücher Ltda, p. 57-58, 178-180, 190-191, 200, 2111-212. 1988.

GARCIA, R. **Combustíveis e combustão industrial**. Rio de Janeiro: Interciência. 2002.

GASBRASIL. **Mercado do gás: Preço do Gás Liquefeito de Petróleo – GLP**. Disponível em: http://www.gasbrasil.com.br/mercado/glp/preco_glp.asp Acesso em: 2 fev. 2006.

GASPETRO. **Petrobrás gás S.A.** Disponível em: <<http://www.gaspetro.com.br>> Acesso em: 25 mar. 2005.

HARA, T. Sistemas de aeração de grãos. Em: LORINI, I.; MIIKE, L. H.; SCUSSEL, V. M (Ed.). **Armazenagem de grãos**. Campinas: IBG. 1ª Ed. 2002. p. 361-377.

HEUERT, K. **Grãos da semente ao consumo**. Ano III, nº15, jun., 2004. p. 29-31.

HIJJAR, M. F. **Logística, soja e comércio internacional**. Centro de Estudos em Logística – COPPEAD/UFRJ. 2004.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M. **Energia e meio ambiente**. Tradução da 3ª ed. Norte Americana – São Paulo: Pioneira Thomson Learning, p. 499. 2003.

IAP. **Evolução do desmatamento no Estado do Paraná**. 2006. Disponível em <<http://www.pr.gov.br>> Acesso em: 26 fev. 2006.

IAPAR. **Cartas climáticas do Paraná**. 2006. Disponível em: <<http://www.iapar.br>> Acesso em: 23 fev. 2006.

IBGE. Indicadores Agropecuários 1996 – 2003. Coordenação de Agropecuária. Rio de Janeiro: IBGE, 2004.

INPE. **O Monitoramento do deflorestamento bruto**, 2003. Disponível em: <<http://www.inpe.br>> Acesso em: 07 jun. 2005.

IPARDES. **Anuário estatístico do Paraná**– 2004. Curitiba 2005.

IPCC. **Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**: Reference Manual (Vol 3). IPCC National Greenhouse Gas Inventory Programme, 1997. Disponível em: <<http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/gl/invs5.htm>> Acesso em: 13 maio 2005.

IPCC. **Emission factor database**. National greenhouse gas inventories programme. 2005.

IPEF. **Produtividade florestal**. Circular técnica nº 164. nov./1988.

JAYAS D. S.; WHITE, N. D. G. **Storage and drying of grain in Canada: low cost approaches**. Food Control 14, p. 255-261. 2003.

JOUTTIJÄRVI, T.; KAUPPI, L.; LEIKOLA, N.; MELANEN, M.; SEPPÄLÄ, J. **Forest Industry and the environment: a life cycle assessment study from Finland**. Resources, Conservation and Recycling 23, p. 87-105. 1998.

KALTSCHMITT, M. REINHARDT, G. A.; STELZER T. **Life cycle analysis of biofuels under different environmental aspects**. Biomass and Bioenergy 12, p. 121-134. 1997.

KORONEOS, C.; MOUSSIOPOULOS, N.; THEODOSIOU G. **Alternative scenarios analysis concerning different types of fuels used for coverage of the energy requirements of a typical apartment building in Thessaloniki, Greece. Part II: life cycle analysis**. Building and Environment 40, p. 1602-1610. 2005.

KOTAS, T. J. **The exergy method of thermal plant analysis**. Londres: Anchor Brendon Ltda. 1985.

LEONG, K.C; KANNAN, R.; OSMAN, R.; HO, H.K. **Life cycle energy, emissions and cost inventory of power generation technologies in Singapore**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2005. Artigo em impressão.

LEWIS, C. A. **Fuel and energy production emission factors**. Meet Project: Methodologies for Estimating Air Pollutant Emissions from Transport. 1997.

LOPES, K. da S.; MARQUES, B. de A.; ERRERA, M. R.; BARBOSA, W. A.; STANESCU, G.; PONTE, M. J. J. de S. Corrida experimental para avaliação da instrumentação no secador de grãos do LEIS. A03-2005, GEANEX, AGROGÁS II, UFPR, Curitiba, Paraná. jun. 2005.

LORA, E. E. S. **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte**. 2ª ed. - Brasília: ANEEL, p. 74, 223-225. 2002.

MARCOLIN, M. **Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa** - Relatórios de referência - Emissões e remoções de dióxido de carbono por mudanças nos estoques de florestas plantadas. Brasília: IBGE. 2002.

MARQUES, B. de A.; ERRERA, M. R.; LOPES, K. da S. Relatório sobre levantamento do perfil energético da empresa IMCOPA - Importação, exportação e Indústria de Óleos Ltda em Araucária – PR. A01-2006, GEANEX, AGROGÁS II, UFPR, Curitiba, Paraná. Fev. 2006a.

MARQUES, B. de A.; ERRERA, M. R.; LOPES, K. da S. Relatório sobre levantamento do perfil energético da empresa CARGILL AGRÍCOLA S/A: unidade de Ponta Grossa. – PR. A02-2006, GEANEX, AGROGÁS II, UFPR, Curitiba, Paraná. Fev. 2006b.

MARTINS, R. S. e CAIXETA FILHO, J. V. **Ferrovias e transporte de produtos agrícolas no Paraná**. Preços Agrícolas. Piracicaba, v. 145, p. 14-17. Nov. 1998.

MATTSSON B.; CEDERBERG C.; BLIX, L. **Agricultural land use in life cycle assessment (LCA): case studies of three vegetable oil crops**. Journal of cleaner Production 8, p. 283-292. 2000.

MCKENDRY, P. **Energy production from biomass (part 1): overview of biomass**. Bioresource Technology 83, p. 37-46. 2002.

MELO, J. F. **A importância da utilização da palma forrageira como alimento para o gado, principalmente na época do verão**. Embrapa Tabuleiros Costeiros – UEP- Rio Largo/AL. Disponível em: <<http://www.cpatc.embrapa.br/>> Acesso em: 26 out. 2005.

MIRANDA, R. F. **Inventário de ciclo de vida de geração hidrelétrica no Brasil** - Usina de Itaipú: 1 aproximação - Vol 1, São Paulo 2003. Dissertação (Mestrado em Energia) PIPGE. Universidade de São Paulo.

MORAN, M. J. **Availability Analysis: A guide to efficient energy use**. New Jersey: Prentice-Hall. 1982.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 4ª Ed. 2002.

MOREIRA, M. T.; RIVELA, B.; MUÑOZ, I.; RIERADEVALL, J.; FEIJOO, G. **Life cycle assessment of wood wastes: A case study of ephemeral architecture**. Science of the Total Environment 357, p. 1-11. 2006.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2ª Ed, p. 38. 2003.

ORTEGA, E; MILLER, M. **Avaliação ecossistêmica - emergética de processos agrícolas e agroindustriais**. Estudo de caso: a produção de soja. FEA-UNICAMP. Campinas 2000.

ÖZBEY, M.; SÖYLEMEZ, M. S. **Effect of swirling flow on fluidized bed drying of wheat grains**. Energy Conversion and Management 46, p. 1495-1512. 2005.

PASSOS, M. de F. S. A. **O gasoduto Bolívia-Brasil**. 1999. Disponível em: <<http://www.ecen.com/eee10/gasp.htm>> Acesso em: 15 set. 2004.

PETROBRAS. **Características do óleo diesel**. Petrobras Distribuidora, 2005. S. A. Disponível em: <<http://www.br.com.br>> Acesso em: 02 jun. 2005.

PRACHAYAWARAKORN, S.; SOPONRONNARIT S.; WIRIYAUMPAIWONG, S. **Comparative study of heating processes for full-fat soybeans**. Journal of Food Engineering 65, p. 371-382. 2004.

PUZZI, D. **Abastecimento e armazenagem de grãos**. Campinas, Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, p. 399-405. 1986.

RAMOS L. P.; ROSSI L. F. S.; COSTA NETO P. R.; ZAGONEL G. F. **Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras**. Quím. Nova 23, nº4. 2004.

RIVA, A.; D'ANGELOSANTE, S.; TREBESCHI, C. **Natural gas and the environmental results of life cycle assessment**. Energy 31, p. 138 – 148. 2006.

RODOSYSTEM. **Transporte**. Disponível em: <<http://www.rodosystem.com.br/>> Acesso em: 21 out. 2005.

RODRIGUES, M.; ARNALDO, W.; FAAIJ, A. **Co-firing of natural gas and biomass gas in biomass integrated gasification/combined cycle systems**. Energy 28, p. 1115–1131. 2003.

ROSA, L. P.; CECCHI, J. C.; SILVA, M. O. DA. **O gás natural na América Latina, no Brasil e no Estado do Rio de Janeiro**. Cadernos de Energia nº. 8, Cento de Estudos de Energia – ENERGE, jun. 1995.

SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R.; ZILLIOTO, M. A. (Ed) **Fixação de carbono: Atualidades, Projetos e Pesquisas**. Curitiba: AM Impressos, p. 114-123. 2004.

SILVA, L. C. da. **Secagem de grãos**. Boletim Técnico: AG: 04/05. Departamento de Engenharia Rural, UFES. 2005.

SILVA, **Fatores antinutricionais: inibidores de proteases e lectinas**. Revista de Nutrição 13, p. 3-9. 2000.

SILVICULTURA. **Caminhões: os pesos pesados**, Piracicaba, v. 55, maio/jun. 1994.

SIMONNE, A. H.; SMITH, M.; WEAVER, D. B.; VAIL, T.; BARNES, S.; WEI, C.I. **Retention and changes of soy isoflavones and carotenoids in immature soybean seeds (Edamame), during processing**. Journal of Agricultural and Food Chemistry 48, p. 6061-6069. 2000.

SOARES, J. B. **Potencial de conservação de energia e de mitigação das emissões de gases efeito estufa para a indústria brasileira de cimento portland até 2015**. Rio de Janeiro, 1998. 152 f. Dissertação (Ciências em planejamento energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SOPONRONNARIT, S.; SWASDISEVI, T.; WETCHACAMA S.; WUTIWIWATCHAI W. **Fluidised bed drying of soybeans**. Journal of Stored Products Research 37, p. 133-151. 2001.

SPEHAR, C. R. **Impact of strategic genes in soybean on agricultural development in brazilian tropical savannahs**. Field Crops Research 41, p. 141-146. 1995.

SRIVASTAVA, V. K.; JOHN, J. **Deep bed grain drying modeling**. Energy Conversion and Management 43, p. 1689–1708. 2002.

UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. 2005. Disponível em: <<http://unfccc.int/2860.php>> Acesso em: 25 out. 2005.

STANESCU, G.; FILIPINI, F.A.; ERRERA, M. R. **Mathematical modeling of industrial soybeans dryers with cogeneration or trigeneration**. In: International Congress of Mechanical Engineering, 17., 2003, São Paulo/Brazil. **Anais...**São Paulo.

TRELSA. **Transporte especializado de líquidos S/A**. Disponível em: <<http://www.trelsa.com.br>> Acesso em: 26 out. 2005.

UGAYA, C. M. L. **Análise de ciclo de vida**: estudo de caso para materiais e componentes automotivos no Brasil. Campinas, 2001. 199 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.

WALL, G. **Exergy - A Useful Concept**. Göteborg: Chalmers Biblioteks Tryckeri, 2 ed.1986.

WANG, J.; ZHANG, H. **Combustion characteristics of a diesel engine operated with diesel and burning oil of biomass**. Renewable Energy 31, p. 1025-1032. 2006.

WANIELISTA, M. **Hidrology and water quantity control**. Florida (UCF): John Wiley & Sons, p. 36-40, 73-78. 1990.

WORLD ENERGY. **Life cycle inventory of biodiesel and petroleum diesel for use in an urban bus**. Chapter 5. Disponível em: <<http://www.worldenergy.net/product/emissions.asp>> Acesso em: 02 fev. 2006.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 – EQUAÇÕES DO SIMULADOR

APÊNDICE 2 – EQUAÇÕES E PARÂMETROS DA PLANTA DE COGERAÇÃO

APÊNDICE 3 - ALGORITMO DESENVOLVIDO PARA SIMULAÇÃO DA
PLANTA DE SECAGEM COM COGERAÇÃO

APÊNDICE 1 – EQUAÇÕES DO SIMULADOR

- Demanda térmica do GN utilizada como base para cálculo das demandas dos outros combustíveis.

$$Q_{GN} = \frac{PCI_{GN} \times C_{GN} \times \eta_i}{5} \times (U_c - U_s) \times G_u \quad (1)$$

onde Q é a demanda térmica, PCI é o poder calorífico inferior, C é o consumo de combustível, η_i é a eficiência do gerador de calor, U_c e U_s é umidade de chegada do campo e saída para armazenamento, respectivamente, G é a quantidade de grãos úmidos, o índice GN refere-se ao gás natural e o termo 5 no denominador é a diminuição da umidade do grão (18 para 13%, referência dos cálculos).

- Demanda térmica e consumo de cada combustível estudado.

$$Q_j = Q_J \times \eta_i \quad (2)$$

o índice j é o índice representativo de cada combustível e i é o índice representativo de cada gerador de calor.

$$C_j = \frac{Q_j}{PCI_j} \quad (3)$$

- Potencial de Aquecimento Global no uso de cada combustível.

$$PAG_j = [FE_{CO_2} + (21 \times FE_{CH_4}) + (310 \times FE_{N_2O})] \times Q_j \quad (4)$$

onde o termo PAG é o potencial de aquecimento global do combustível (expresso em CO_2^{eq}) e FE é o fator de emissão.

- Potencial de acidificação no uso de cada combustível.

$$PAC_j = [(FE_{NO_x} \times 0,7) + FE_{SO_x}] \times Q_j \quad (5)$$

o termo PAC é o potencial de acidificação de cada combustível (expresso em SO_2^{eq}).

- Potencial de aquecimento global no transporte de grãos.

$$PAG_{TG} = \frac{G}{CP_{TG}} \times FE_{CO_2^{eq}} \quad (6)$$

onde CP é a capacidade do Caminhão e o índice TG é transporte de grãos.

- Potencial de acidificação no transporte de grãos.

$$PAC_{TG} = \frac{G}{CP_{TG}} \times FE_{SO_2^{eq}} \quad (7)$$

- Potencial de aquecimento global no transporte dos combustíveis (menos GN).

$$PAG_{Tj} = \frac{C_j}{CP_{Tj}} \times FE_{CO_2^{eq}} \quad (8)$$

- Potencial de aquecimento global no transporte de GN.

$$PAG_{GN} = C_{GN} \times FE_{CO_2^{eq}} \quad (9)$$

- Potencial de Acidificação no transporte dos combustíveis com exceção do GN.

$$PAC_{Tj} = \frac{C_j}{Cp_{Tj}} \times FE_{SO_2^{eq}} \quad (10)$$

- Potencial de Acidificação no transporte de GN.

$$PAC_{GN} = C_{GN} \times FE_{SO_2^{eq}} \quad (11)$$

- Potencial de aquecimento global na produção de cada combustível com exceção da lenha.

$$PAG_{Pj} = C_j \times FE_{CO_2^{eq}} \quad (12)$$

- Potencial de Acidificação na produção de cada combustível.

$$PAC_{Pj} = C_j \times FE_{SO_2^{eq}} \quad (13)$$

- Potencial de aquecimento global na produção de lenha.

$$PAG_L = ELC \times ARS \quad (14)$$

onde ELC são as emissões líquidas de carbono e ARS são as áreas de reflorestamento sustentável.

- Emissão de material particulado de cada combustível.

$$MP_j = FE_{MP} \times C_j \quad (15)$$

o termo MP é material particulado.

- Área de reflorestamento.

$$ARS = \frac{C_L}{PR} \times CCF \quad (16)$$

onde PR é produtividade de lenha e CCF é o ciclo de crescimento da espécie.

- Quantidade de Secadores.

$$NSC = \frac{G}{CS} \quad (17)$$

onde o termo NCS significa número de secadores e CS é a capacidade do secador.

-Energia elétrica total.

$$EL = Pt_p \times TO_p + Pt_{Sc} \times TO_{Sc} \times NS + Pt_{Lp} \times TO_{Lp} + Pt_{Ae} \times TO_{Ae} \quad (18)$$

onde EL é a energia elétrica total, Pt é a potência necessária, TO é o tempo de operação e os índices p, Sc, Lp, Ae são as etapas de pré-limpeza, secagem, limpeza e aeração.

- Quantidade de grãos secos.

$$G_{Secos} = G - \frac{U_c - U_a}{100} \times G \quad (19)$$

- Quantidade de armazéns.

$$NA = \frac{G_{Secos}}{A} \quad (20)$$

onde NA é o numero de armazéns, e A é a sua capacidade.

- Quantidade de silos.

$$NS = \frac{G_s}{S} \quad (21)$$

onde NS é o numero de silos, e S é a sua capacidade.

- Área de chapas de aço necessária para construção de 01 unidade de armazém, secador ou silo.

$$AT = A_l + A_{cob} \quad (22)$$

Onde AT é a área total do equipamento, A_l é a área lateral e A_{cob} é a área da cobertura.

- Quantidade de aço necessária para construção de 01 unidade de armazém, secador ou silo.

$$Ac = \varepsilon \times AT \times \rho \quad (23)$$

onde, Ac é a quantidade de aço necessária para um armazém ou silo, ε é a espessura do aço e ρ é a sua densidade.

- Quantidade de aço necessária para construção de todos os armazéns.

$$AC_t = AC \times NA \quad (24)$$

- Quantidade de aço necessária para construção de todos os silos.

$$AC_t = AC \times NS \quad (25)$$

- Quantidade de aço necessária para construção de todos os secadores.

$$AC_t = AC \times NSC \quad (26)$$

APÊNDICE 2 – EQUAÇÕES E PARÂMETROS DA PLANTA DE COGERAÇÃO

As equações foram divididas por volume de controle da Figura 37.

CALDEIRA

Balanço de massa

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_5 \quad (1)$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 \quad (2)$$

$$\dot{m}_2 = AC \times \dot{m}_1 \quad (3)$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_{2v} + \dot{m}_{2a} \quad (4)$$

$$\dot{m}_{2v} = \dot{m}_{2a} \times w_2 \quad (5)$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_{5a} + \dot{m}_{5v} \quad (6)$$

$$\dot{m}_{5v} = \dot{m}_{5a} \times w_5 \quad (7)$$

Balanço de energia

$$\dot{m}_1 PCI_{gn} + \dot{m}_{2a} h_{2a} + \dot{m}_{2v} h_{2v} + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_{5a} h_{5a} + \dot{m}_{5v} h_{5v} + \dot{m}_4 h_4 + Q_1 \quad (8)$$

onde, Q_1 é a perda na caldeira.

$$H_{2a} = c_p \times (T_{amb} - T_0) \quad (9)$$

$$h_{5a} = c_p \times (T_e - T_0) \quad (10)$$

TURBINA A VAPOR

Balanço de massa

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_6 \quad (11)$$

Balanço de Energia

$$\dot{m}_4 h_4 = W_{el} + \dot{m}_6 h_6 + Q_2 \quad (12)$$

onde, Q_2 é a perda na turbina a vapor.

QUEIMADOR

Balanço de massa

$$\dot{m}_8 + \dot{m}_9 = \dot{m}_{10} \quad (13)$$

$$\dot{m}_9 = AC \times \dot{m}_8 \quad (14)$$

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{9v} + \dot{m}_{9a} \quad (15)$$

$$\dot{m}_{9v} = \dot{m}_{9a} \times w_9 \quad (16)$$

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_{10a} + \dot{m}_{10v} \quad (17)$$

$$\dot{m}_{10v} = \dot{m}_{10a} \times w_{10} \quad (18)$$

Balanço de energia

$$\dot{m}_8 \text{PCI}_{\text{gn}} + \dot{m}_{9a} h_{9a} + \dot{m}_{9v} h_{9v} = \dot{m}_{10a} h_{10a} + \dot{m}_{10v} h_{10v} + Q_3 \quad (19)$$

Onde, Q_3 é perda no queimador.

$$h_{9a} = h_{2a} \quad (20)$$

$$h_{9v} = h_{2v} \quad (21)$$

$$h_{10a} = c_p \times (T_{e2} - T_0) \quad (22)$$

CÂMARA DE MISTURA

Balanço de massa

$$\dot{m}_5 + \dot{m}_{10} + \dot{m}_{11} + \dot{m}_6 = \dot{m}_t + \dot{m}_7 \quad (23)$$

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_7 \quad (24)$$

$$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{11v} + \dot{m}_{11a} \quad (25)$$

$$\dot{m}_{11v} = \dot{m}_{11a} \times w_{11} \quad (26)$$

$$\dot{m}_t = \dot{m}_{tv} + \dot{m}_{ta} \quad (27)$$

$$\dot{m}_{tv} = \dot{m}_{ta} \times w_{ta} \quad (28)$$

Balanço de energia

$$\dot{m}_{5a} h_{5a} + \dot{m}_{5v} h_{5v} + \dot{m}_{10a} h_{10a} + \dot{m}_{10v} h_{10v} + \dot{m}_{11a} h_{11a} + \dot{m}_{11v} h_{11v} + \dot{m}_6 h_6 = \quad (29)$$

$$\dot{m}_{tv} h_{tv} + \dot{m}_{ta} h_{ta} + \dot{m}_7 h_7$$

$$h_{11a} = h_{2a} \quad (30)$$

$$h_{11v} = h_{2v} \quad (31)$$

$$h_{ta} = c_p \times (T_t - T_0) \quad (32)$$

PARÂMETROS ADOTADOS

$T_0 = 273,15 \text{ K} \rightarrow$ Temperatura de referência

$T_{\text{amb}} = 298,15 \text{ K} \rightarrow$ Temperatura ambiente

$C_p = 1,0 \rightarrow$ calor específico do ar seco

$w_{\text{amb}} = 0,0119 \rightarrow$ umidade absoluta (kg água/kg de ar seco) (UR 60%, 25°C)

$\text{PCI}_{\text{gn}} = 47729 \text{ kJ/kg}$

$\text{AC} = 17,23 \rightarrow$ razão ar/combustível estequiométrica ($\text{kg}_{\text{ar}}/\text{kg}_{\text{comb}}$)

$T_e = 393,15 \text{ K} \rightarrow$ temperatura dos gases de exaustão da caldeira (T_{adc} Temperatura adiabática de chama)

$T_{e2} = 2328 \text{ K} \rightarrow$ temperatura dos gases de exaustão do queimador

$T_t = 373,15 \text{ K} \rightarrow$ temperatura do ar de secagem

Entalpias

$h_{2v} = 550,2 \text{ kJ/kg}$

$h_3 = 103,9 \text{ kJ/kg}$

$h_4 = 3145 \text{ kJ/kg}$

$h_{5v} = 225,29 \text{ kJ/kg}$

$h_6 = 2706,6 \text{ kJ/kg}$

$h_7 = 419,2 \text{ kJ/kg}$

$h_{10v} = 4982 \text{ kJ/kg}$

$h_{tv} = 222,06 \text{ kJ/kg}$

APENDICE 3 - ALGORITMO DESENVOLVIDO PARA SIMULAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM COM COGERAÇÃO

```
// Programa elaborado para planta de secagem com cogeração
// Autor: Breno de A. Marques
// Local: Universidade Federal do Paraná
//      Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental
// Objetivo: Determinar emissões atmosféricas com uso de cogeração
// Versão : 1.0
// Criado em : 14/fev/06
// Última versão: 02/mar/06
// COG_FEC2.msm

//=====

// FATORES QUE DEPENDEM DO COMBUSTIVEL UTILIZADO
// GAS NATURAL //
PCI=47729 // kJ/kgK
AC = 17.23 // massa de ar por massa de combustível
cp = 1.0 // calor específico ar ambiente
Vaz_GNs=m8*vCNTP*36 // Nm3/ton soja alimentada
Vaz_GNc=m1*vCNTP*36 // Nm3/ton soja alimentada
Vaz_tot = Vaz_GNs + Vaz_GNc
vCNTP = v_TP("CH4",273.15,101.35)
T0 = 273.15
Tamb= 298.15
wamb = 0.0119 // UR 60% , 25 oC

//=====

// VARIACAO PARAMETRICA PARA A COGERACAO
aux1 = 2000/100 // percentual de ponderacao de uso de combustivel -- 0 --> secador e 100 -->
caldeira
m1 - aux1*m8 = 0

//=====

//Volume de controle da caldeira
//balanço de massa
m1 + m2 = m5
m2 = AC*m1
m2a = m2 - m2v
m2v =m2a * w2
w2 = wamb
w5 = 0.14// kg H2O p/ kg prod. comb. sec
m5a = m5 - m5v
m5v = m5a * w5
m3 = m4
m4 = ((m1*PCI + m2v*h2v + m2a*h2a)/(h4-h3))*etac1

cg = 0.15 // percentual de carbono nos gases de combustão
mCO2c=m5*cg // kg/s - vazão de CO2 emitida pela caldeira
mesp_CO2c= mCO2c/(100/3600) // kg/ton - vazão de CO2 da caldeira por tonelada de soja
alimentada
FE_Cald = mCO2c/m1/PCI*1e6/etac
```

te= 393.15 // k

//balanço de energia

$$m1*PCI + m2a*h2a + m2v*h2v + m3*h3 = m5a*h5a + m5v*h5v + Q1 + m4*h4$$

$$eta_c1 = 0.94$$

$$eta_c2 = 0.05$$

$$eta_c = eta_c1 + eta_c2$$

$$Q1 = (1 - eta_c) * (m1*PCI + m2a*h2a + m2v*h2v)$$

$$h2a = cp * (T_{amb} - T0)$$

$$h2v = 550.2 // \text{ kJ/kg}$$

$$h3 = 103.9 // \text{ kJ/kg}$$

$$h4 = 3145. // \text{ kJ/kg}$$

$$h5a = cp*(te - T0)$$

$$h5v = 225.29 // \text{ kJ/kg}$$

$$check_C = m1*PCI + m2a*h2a + m2v*h2v + m3*h3 - (m5a*h5a + m5v*h5v + Q1 + m4*h4)$$

//=====

//Volume de controle da TURBINA

//balanço de massa

$$m4 = m6$$

//balanco de energia

$$m4*h4 = Q2 + W_{el} + m6*h6$$

$$Q2 = 0.01*(m4*(h4 - h6))$$

$$h6 = 2706.6 // \text{ kJ/kg}$$

$$check_T = m4*h4 - (Q2 + W_{el} + m6*h6)$$

//=====

//Volume de controle do queimador do secador

//balanço de massa

$$m8 = m10 / (1 + AC)$$

$$m9 = AC * m8$$

$$m9a = m9 - m9v$$

$$m9v = m9a * w9$$

$$w9 = w_{amb} // \text{ UR } 60\%, 25 \text{ oC}$$

$$w10 = 0.14 // \text{ kg H}_2\text{O p/ kg produto de combustão seco}$$

$$m10 = m10a + m10v$$

$$//m10a = -aux5 / (h10a + w10 * h_{tv})$$

$$m10v = w10 * m10a$$

$$mCO2q = m10 * c_g // \text{ k/s}$$

$$m_{esp_CO2q} = mCO2q / (100/3600) // \text{ kg/ton de soja alimentada}$$

$$FE_Queim = mCO2q / m8 / PCI * 1e6 / (1 - eta_{aq_p})$$

//balanço de energia

$$m8 * PCI + m9a * h9a + m9v * h9v = m10a * h10a + m10v * h10v + Q3$$

eta_{aq_p} = 0.001 // percentual de perda de calor do queimador

$$Q3 = eta_{aq_p} * (m8 * PCI + m9a * h9a + m9v * h9v)$$

$$h9a = h2a$$

$$h9v = h2v$$

$$h10a = 2628.96 // \text{ kJ/kg}$$

$$h10v = 4982 // \text{ kJ/kg}$$

$$\text{check_Q} = m8*PCI + m9a*h9a + m9v*h9v - (m10a*h10a + m10v*h10v + Q3)$$

//=====

// Volume de controle da camara de mistura

// balanço de massa

$$m7 = m6$$

$$m11 = mt - m5 - m10 \text{ // ar de secagem em kg/s}$$

$$m11a = m11 - m11v$$

$$m11v = w11 * m11a$$

$$w11 = wamb \text{ // UR 60\%, 25 oC}$$

$$mt = 80.0 \text{ // kg/s}$$

$$mta = mt - mtv$$

$$mtv = mta * wt$$

$$wt = (m10v + m11v + m5v) / (m10a + m11a + m5a)$$

// balanço de energia

$$aux2 = m10a*h10a + m10v*h10v + m5a*h5a + m5v*h5v + m11a*h11a$$

$$aux4 = m11v*h11v + m6*h6$$

$$aux3 = mta*hta + mtv*htv + m7*h7$$

$$aux5 = aux2 + aux4 - aux3$$

$$h11a = h2a$$

$$h11v = h2v$$

$$htv = 222.06$$

$$hta = cp * (Tt - T0)$$

$$h7 = 419.2 \text{ // kJ/kg}$$

$$Tt = 373.15$$

$$\text{check_C_M} = m10a*h10a + m10v*h10v + m5a*h5a + m5v*h5v + m11a*h11a + m11v*h11v + m6*h6 - mta*hta + mtv*htv + m7*h7$$

//=====

// Condensador Complementar

//Balanço de massa

$$m7 = m20$$

//Balanço de Energia

$$Qc = m7*h7 - m20*h20$$

$$h20 = h3$$

$$\text{check_Cond_Comp} = m7*h7 - m20*h20 - Qc$$

//=====

//Bomba

$$p21 = 1400 \text{ // kPa}$$

$$p20 = 200 \text{ // kPa}$$

$$Wb = m20 * 0.001 * (p21 - p20)$$

//=====

$$aux6 = ((m1+m8)*PCI + m2a*h2a + m2v*h2v + m9a*h9a + m9v*h9v + m11a*h11a + m11v*h11v + Wb)$$

$$aux7 = (mtv*htv + mta*hta + Wel + Q1 + Q2 + Q3 + Qc)$$

$$\text{check_global} = aux6 - aux7$$

//=====

// Eficiência exergética

Ex1 = m1*ex1
ex1 = phi1*PCI
phi1 = 1.04 //
Ex8 = m8*ex1

Ex2 = 0 // Exergia do ar ambiente
Ex9 = 0 // Exergia do ar ambiente
Ex11 = 0 // Exergia do ar ambiente

wtil_t = wt*1.6078 // 0.0234
wtil_0 = w2*1.6078 // 0.019132
theta_t = Tt/100
cpv = (143.05 -183.54 * theta_t^0.25 + 82.751*theta_t^0.5 - 3.6989*theta_t)/18
Ra = 0.2870 // kJ/kgK

ex_t = Tamb* ((cp+wt*cpv)* ((Tt/Tamb) - 1 - 0.224) + Ra* Tamb *((1+wtil_t)* (-
0.00417) + wtil_t * 0.201))

Ex_t = mta * ex_t

Efc_ex = (Wel + Ex_t)/(Ex1 + Ex8 +Ex2 + Ex9 + Ex11 + Wb)*100

//=====

ANEXOS

ANEXO 1 – TABELA DO TOTAL DA CAPACIDADE ESTÁTICA DE
ARMAZENAMENTO DO BRASIL (CONAB)

ANEXO 2 – PLANILHA DE DADOS UTILIZADA NA PESQUISA DE CAMPO

ANEXO 3 – MAPA DA PRECIPITAÇÃO MÉDIA ANUAL DO PARANÁ


**ANEXO 1 - TABELA ATUAL DO TOTAL DA CAPACIDADE ESTÁTICA DE
ARMAZENAMENTO POR UNIDADE DE FEDERAÇÃO NO
BRASIL (CONAB)**

Regiões	Convencionais		Granéis		Totais	
	Qtde	Capacidade	Qtde	Capacidade	Qtde	Capacidade
Centro-Oeste						
Distrito Federal	33	100.240	19	212.820	52	313.060
Goiás	348	1.634.160	430	9.511.710	778	11.145.870
Mato Grosso	614	3.395.150	825	12.602.470	1439	15.997.620
Mato Grosso do Sul	222	711.770	503	5.132.380	725	5.844.150
Totais Região	1217	5.841.320	1777	27.459.380	2994	33.300.700
Nordeste						
Alagoas	51	246.640	10	39.650	61	286.290
Bahia	381	667.880	187	2.224.400	568	2.892.280
Ceará	86	231.740	11	143.440	97	375.180
Maranhão	53	162.200	55	820.340	108	982.540
Paraíba	28	55.620	2	11.450	30	67.070
Pernambuco	66	491.280	39	203.950	105	695.230
Piauí	52	75.120	11	73.880	63	149.000
Rio Grande do Norte	19	67.210	1	4.500	20	71.710
Sergipe	4	10.750	1	5.750	5	16.500
Totais Região	740	2.008.440	317	3.527.360	1057	5.535.800
Norte						
Acre	14	28.430	0	0	14	28.430
Amapá	1	820	0	0	1	820
Amazonas	16	36.100	0	0	16	36.100
Pará	121	232.310	24	70.220	145	302.530
Rondônia	79	209.650	17	231.860	96	441.510
Roraima	5	12.510	2	6.380	7	18.890
Tocantins	126	693.740	55	591.750	181	1.285.490
Totais Região	362	1.213.560	98	900.210	460	2.113.770
Sudeste						
Espírito Santo	64	431.710	15	485.810	79	917.520
Minas Gerais	717	2.428.260	297	3.898.110	1014	6.326.370
Rio de Janeiro	20	142.230	8	95.250	28	237.480
São Paulo	887	5.329.510	356	4.529.280	1243	9.858.790
Totais Região	1688	8.331.710	676	9.008.450	2364	17.340.160
Sul						
Paraná	1437	5.197.620	1509	16.632.460	2946	21.830.080
Rio Grande do Sul	1468	2.876.230	2604	18.353.120	4072	21.229.350
Santa Catarina	271	543.080	424	2.757.970	695	3.301.050
Totais Região	3176	8.616.930	4537	37.743.550	7713	46.360.480

TOTAIS BRASIL	7183	26.011.960	7405	78.638.950	14588	104.650.910
----------------------	-------------	-------------------	-------------	-------------------	--------------	--------------------

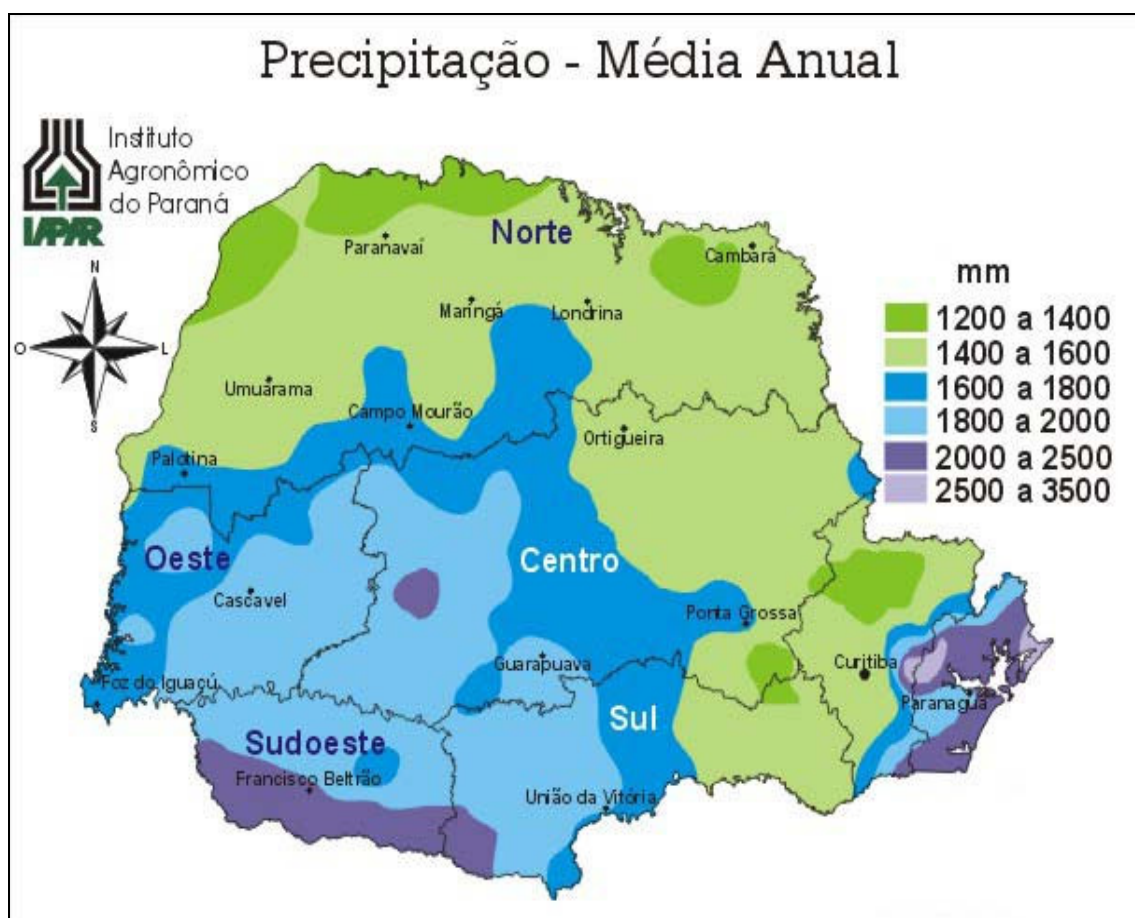
FONTE: CONAB/SUARM/GECAD

ANEXO 2 – PLANILHA DE DADOS UTILIZADA NA PESQUISA DE CAMPO

PLANILHA DE LEVANTAMENTO DE DADOS PARA ANÁLISE ENERGÉTICA & EXERGÉTICA 				
INFORMAÇÃO DO CLIENTE (se possível, fornecer cartão de visita)				
Nome :				
Atividade Principal :				
Contato :				e-mail: _____
Telefone:			Fax :	_____
DETALHES DE INFORMAÇÃO DO CLIENTE				
Localização da unidade a ser avaliada :				
Idade da instalação (anos) :			Vida útil da instalação:	_____
Horas de Operação Anual (@ especificar sábados e domingos)				
Possui área de reflorestamento? <input type="checkbox"/> Sim ⁽¹⁾ <input type="checkbox"/> Não	Qual a Espécie?		_____	
	Qual a área plantada? (ha)		_____	
	Qual a produtividade?		_____	
RECURSOS				
1 - MATÉRIA PRIMA				
1.1 - Tipo / Manufatura (Soja, milho, arroz, trigo, etc.)				
1.2 - Fornecedor / Procedência				
1.3 - Umidade mínima de chegada do grão (%)				
1.4 - Umidade máxima de chegada do grão (%)				
1.5 - Consumo Anual (indicar unidade)				
2 - ENERGIA ELÉTRICA UTILIZADA (fornecer faturas de energia elétrica da concessionária, se possível for)				
2.1 - Fornecedor / Procedência (Concessionária, Geração Própria)				
2.2 - Tipo de tarifa				
2.3 - Demanda Máxima (kW)				
2.4 - Demanda contratada (kW)				
2.5 - Demanda Média Média (kW)				
2.6 - Consumo Anual (kWh/ano)				
2.7 - Consumo mensal (kWh)				
2.7 - Preço médio por demanda (R\$/kW)				
2.8 - Preço Médio da Energia Elétrica (R\$/MWh)				
2.9 - Despesas Anual de Energia Elétrica (R\$/ano)				
2.10 - Fator de potência				
2.11 - Tensão contratada (volts) ⁽²⁾				
3 - COMBUSTÍVEL				
3.1 - Tipo (Gás Natural, Lenha, Óleo BPF etc.)				
3.2 - Fornecedor / Procedência				
3.3 - Aplicação (Geração de Vapor, Aquecimento, Refrigeração etc.)				
3.6 - Pressão de Trabalho (indicar unidade)				
3.7 - Umidade (%)				
3.8 - Consumo Anual (m³/ano)				
3.9 - Preço Médio do Combustível (R\$/m³)				
3.10 - Despesas Anual do Combustível (R\$/ano)				
PRODUTOS				
4 - PRODUTO FINAL				
8.1 - Tipo (soja em grãos, óleo bruto ou refinado, etc.)				
8.2 - Umidade de saída do produto (%)				
8.3 - Temperatura (°C)				
8.4 - Produção Anual (toneladas)				
8.5 - Capacidade Máxima (indicar unidade)				
USO DE ENERGIA				
5 - GERAÇÃO DE ENERGIA (Caldeira, Aquecedores, Refrigerados, Chillers, Secadores de Soja etc.)				
13.1 - Tipo (Caldeira, Secadores de Soja etc.)				
13.2 - Fabricante / Modelo				
13.3 - Produto (Vapor, Água Quente, Água Gelada, Refrigeração etc.)				
13.4 - Identificação de Combustível (@ vincular ao combustível no produto)				
13.5 - Capacidade Máxima (ton/h)				
13.6 - Consumo Anual de Combustível (indicar unidade)				
13.7 - Pressão de Trabalho (indicar unidade)				
13.8 - Temperatura de Interna do gerador de energia (°C)				
13.9 - Temperatura mínima de Saída do Processo (°C)				
13.10 - Temperatura máxima de Saída do Processo (°C)				
13.10 - Vida Útil do Equipamento (anos)				
13.11 - Operação (h/ano)				

PROCESSO				
16 - SISTEMA DE SECAGEM				
16.1 - Tecnologia do Processo de Secagem (Fluxo Contínuo, Estático etc.)				
16.2 - Meses de Utilização do Sistema de Secagem				
16.3 - Vida Útil dos Equipamentos Existentes (anos)				
16.4 - Distância do Sistema de Secagem até possível entrada do Gás Natural (m)				
17 - DESCRIÇÃO DO PROCESSO INDUSTRIAL DE SECAGEM				
17.1 - Tipo de Combustível no Processo <small>(@ associar com combustível e energia elétrica, quando for o caso)</small>	Secagem (Lenha, Óleo BPF, Eletricidade etc.)			
	Esmagamento (Eletricidade, Vapor etc.)			
	Refinamento (Eletricidade, Vapor etc.)			
	Hidrogenação (Margarina)			
17.2 - Capacidade Instalada <small>(toneladas de soja seca)</small>	Secagem			
	Esmagamento			
	Refinamento			
	Hidrogenação (Margarina)			
	Armazenamento			
17.3 - Tipo de Equipamento Utilizado <small>(Fabricante/Modelo)</small>	Secagem			
	Esmagamento			
	Hidrogenação (Margarina)			
	Armazenamento			
18 - SISTEMA DE REFINO				
18.1 - Tecnologia do Processo de Refino				
18.2 - Meses de Utilização do Sistema de Refino				
18.3 - Processo contínuo, semi-contínuo ou batelada?				
18.4 - Vida Útil dos Equipamentos Existentes (anos)				
18.5 - Distância do Sistema de Refino até possível entrada do Gás Natural				
19 - DESCRIÇÃO DO PROCESSO INDUSTRIAL DE REFINO				
		EQUIPAMENTOS (nomear os equipamentos nas células abaixo)		
19.1 - Tipo de Combustível no Processo <small>(@ associar com combustível e energia elétrica, quando for o caso)</small>	Degomagem			
	Neutralização			
	Desodorização			
	Branqueamento			
	Winterização			
19.2 - Capacidade Instalada <small>(anotar a unidade)</small>	Degomagem			
	Neutralização			
	Desodorização			
	Branqueamento			
	Winterização			
19.3 - Tipo de Equipamento Utilizado <small>(Fabricante/Modelo)</small>	Degomagem			
	Neutralização			
	Desodorização			
	Branqueamento			
	Winterização			
Direitos reservados ao grupo GEANEX/UFPR - Projeto Agrogás				
versão 01/2005-2 (ver.MRE 21/7/05)				

ANEXO 3 – MAPA DA PRECIPITAÇÃO MÉDIA ANUAL DO PARANÁ



FONTE: IAPAR (2006)